



Márcio Rodrigues Alves

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Período de tempo disponível para a compactação de misturas betuminosas: análise paramétrica

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Doutor Rui Alexandre Lopes Baltazar Micaelo

Co-orientador: Doutor Daniel Aelenei

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutora Ildi Cismasiu

Arguente: Doutor Ionut Moldovan

Vogal: Doutor Rui Alexandre Lopes Baltazar Micaelo



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março de 2014

‘Copyright’ Márcio Rodrigues Alves, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores pela disponibilidade e pelo apoio imprescindível que me foi dado por eles ao longo de todo este caminho.

Agradeço ao Eng. Ricardo Laires pela ajuda que me foi prestada no âmbito do Matlab ®

Aos meus amigos e colegas que me acompanharam neste percurso, em especial ao Pedro Viegas ao João Valério ao Gonçalo Lino à Cátia Abreu à Lara Neves ao Tiago Madeira ao João Nabais e ao Diogo Resende.

À Juliana por todo o apoio, carinho e paciência ao longo destes anos.

Aos meus pais e irmão um agradecimento especial pelo esforço e dedicação ao longo de todo o meu percurso académico.

RESUMO

A compactação de misturas betuminosas, apesar de ser a última etapa da construção de um pavimento rodoviário, tem uma importância fundamental para o comportamento do material em serviço. As alterações impostas aquando da compactação conferem ao material a capacidade para que o pavimento suporte as cargas sem se deformar de forma comprometedora e que não apresente fendilhamento prematuro. A operação de compactação deverá ser realizada enquanto a temperatura do material está no intervalo de temperaturas consideradas adequadas.

O objectivo principal deste trabalho é o estudo da previsão do tempo disponível para a compactação. Assim, construiu-se uma ferramenta numérica para a previsão do arrefecimento da camada de mistura betuminosa após a aplicação. Adoptou-se o método do equilíbrio energético, um método directo, às equações de transmissão de calor para determinar a temperatura em função do tempo e da posição em altura na camada. O arrefecimento da camada de desgaste foi calculado tendo em conta a transmissão de calor por condução, convecção e radiação. Foi realizada a análise da influência das condições atmosféricas e das características do material no arrefecimento da camada de mistura betuminosa aplicada.

No estudo admitiram-se quatro estruturas de pavimento, com diferentes espessuras e materiais, e efectuou-se a análise das condições atmosféricas, onde foram tidas em conta os seguintes parâmetros: temperatura do ar; velocidade do vento; nebulosidade. Na variação das condições dos materiais foi considerada a variação da temperatura de aplicação da mistura betuminosa e a variação do coeficiente de condutibilidade térmica do material aplicado. Por último, foi modelado o processo construtivo, pela variação da espessura e das propriedades dos materiais de acordo com a compactação prevista.

Concluiu-se que as características atmosféricas têm um peso substancialmente maior no tempo de arrefecimento quando comparadas com as alterações impostas nas propriedades dos materiais. O vento surge como o factor atmosférico que mais influencia o arrefecimento, sendo possível também concluir que para ser possível ter a percepção do efeito provocado pela nebulosidade é necessário ter em conta a sua influência na temperatura do ar. Contudo o maior condicionante do tempo disponível é a espessura da camada de mistura betuminosa aplicada.

O resultado final deste trabalho é um modelo numérico, que pode ser usado para prever o arrefecimento de uma camada de mistura betuminosa aplicada com base nas condições atmosféricas verificadas e características térmicas dos materiais envolvidos, com base nos três fenómenos de transmissão térmica: condução; convecção; radiação.

Termos chave: temperatura; misturas betuminosas; pavimentação; transmissão de calor; tempo disponível para compactação.

ABSTRACT

Although compaction of bituminous mixtures is the last task in the road construction process it is determinant for the material's in-service performance. The volumetric changes imposed to the material during compaction are required so that the pavement can withstand traffic loading without excessive deformation and cracking. Compaction must be performed while the material temperature is within the temperature range considered appropriate.

This work is aimed at studying the prediction of the time available for compaction of bituminous mixtures in field. A numerical tool was built for the prediction of the asphalt layer cooling process, after paving. The energy balance method was used to solve the heat transfer equations (convection, conduction and radiation). The temperature is determined as function of the time and the height position in the layer. The influence of the weather conditions and the materials thermal properties in the asphalt layer cooling is analyzed.

Four different pavement structures, with different asphalt materials and layer thicknesses, are admitted in this study. The weather conditions are changed by considering different values for the air temperature, the wind speed and the cloudiness. For the asphalt is considered the variation of the paving temperature and of the thermal conductivity coefficient. Also, the construction process was modeled by varying the layer thickness and the asphalt properties along compaction.

The results show that the weather conditions affect considerably the cooling time while the type of material is less important. The wind speed is the atmospheric factor that has more influence in cooling. The cloudiness has no effect if considered independent of air and ground temperatures. Nevertheless, the single factor with the highest influence in the available time for compaction is the asphalt layer thickness.

The main output of this project is a numerical tool that predicts the cooling of an asphalt layer after being paved considering the weather conditions and the materials' thermal properties.

Keywords: temperature; bituminous mixtures; paving; heat transfer; time available for compaction.

ÍNDICE

RESUMO	I
ABSTRACT	III
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE QUADROS	IX
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS	XI

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA	1
1.2. OBJECTIVO	1
1.3. METODOLOGIA	1
1.4. ESTRUTURA DO DOCUMENTO	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.2. COMPACTAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS	3
2.2.1. <i>Pavimentação</i>	3
2.2.2. <i>Definição de compactação</i>	6
2.2.3. <i>Objectivo da compactação</i>	6
2.2.4. <i>Tempo disponível para a compactação</i>	6
2.3. FENÓMENOS FÍSICOS	8
2.3.1. <i>Transferência de calor por condução</i>	9
2.3.2. <i>Transferência de calor por convecção</i>	10
2.3.3. <i>Transferência de calor por radiação</i>	12
2.3.4. <i>Modelos existentes</i>	15
2.3.6. <i>Características térmicas dos materiais</i>	15
3. MODELO DE PREVISÃO	17
3.1. INTRODUÇÃO	17
3.2. CONSIDERAÇÕES INICIAIS NA CONCEPÇÃO DO MODELO	17
3.2.1. <i>Evolução da temperatura na estrutura</i>	17
3.2.2. <i>Dados de entrada</i>	18
3.2.3. <i>Dados de saída</i>	18
3.2.4. <i>Temperatura do ar</i>	19

3.2.5. Coeficiente de convecção.....	20
3.3. MODELO DE CÁLCULO DO TEMPO DISPONÍVEL PARA A COMPACTAÇÃO	21
3.3.1. Considerações gerais	21
3.3.2. Interface ar - superfície do pavimento	22
3.3.3. Fluxo de calor por condução unidireccional	23
3.3.4. Interface entre duas camadas	23
3.3.5. Método do equilíbrio energético	24
3.3.6. Critério de estabilidade	28
4. CASO DE ESTUDO	29
4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	29
4.2. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS CONSIDERADOS.....	29
4.3. COMPARAÇÃO COM MODELOS DE CÁLCULO EXISTENTES	30
4.4. CASOS CONSIDERADOS	34
4.4.1. Perfis de temperatura	34
4.4.2. Arrefecimento ao longo do tempo	38
4.5. CONDIÇÕES DE ANÁLISE PARAMÉTRICA	41
4.6. VARIAÇÃO DAS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS.....	42
4.6.1. Variação da temperatura do ar	42
4.6.2. Variação da velocidade do vento	49
4.6.3. Variação da nebulosidade	53
4.7. VARIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DOS MATERIAIS.....	58
4.7.1. Variação da temperatura de aplicação da mistura betuminosa	58
4.7.2. Variação das características dos materiais	61
4.8. PROCESSO CONSTRUTIVO – COMPACTAÇÃO	65
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
5.1. CONCLUSÕES	71
5.2. PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	72
BIBLIOGRAFIA.....	73
APÊNDICES.....	75
MODELO DE CÁLCULO GERAL	77
MODELO COM O EFEITO DA COMPACTAÇÃO	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Estrutura de pavimento rodoviário	4
Figura 2.2 – Pavimentadora - (Dynapac, 2000)	4
Figura 2.3- Equipamento de transferência de misturas betuminosas (Alimentador móvel) – (Dynapac, 2000)	5
Figura 2.4 – Execução em obra da transferência de misturas betuminosas	5
Figura 2.5 – Cilindro vibrador tandem – (Dynapac, 2000)	6
Figura 2.6 – Variação da temperatura ao longo da camada para diferentes espessuras	7
Figura 2.7 – Trocas de calor entre o pavimento e a envolvente	8
Figura 2.8 – Evolução do fluxo de calor por condução no material	9
Figura 2.9 – Arrefecimento do pavimento por convecção forçada.....	11
Figura 2.10 – Radiação na superfície do pavimento.....	12
Figura 2.11– Revolução da terra à volta do Sol	13
Figura 3.1 – Distribuição inicial da temperatura	18
Figura 3.2 – Média da temperatura média mensal, estação de Vila Real	19
Figura 3.3 - Média da temperatura média mensal, estação de Lisboa	20
Figura 3.4 – Média da temperatura média mensal, estação de Faro	20
Figura 3.5 – Modelação da estrutura	21
Figura 3.6 – Superfície da mistura betuminosa em contacto com o ar	22
Figura 3.7 – Transferência de calor por condução entre dois materiais diferentes	24
Figura 3.8 – Malha unidireccional da camada de revestimento	24
Figura 4.1 – Arrefecimento ao longo do tempo	31
Figura 4.2 – Arrefecimento ao longo do tempo - (PaveCool).....	31
Figura 4.3 – Comparação de arrefecimento PaveCool/Modelo – Caso 1	33
Figura 4.4 – Comparação de arrefecimento PaveCool/Modelo – Caso 2	33
Figura 4.5 – Comparação de arrefecimento PaveCool/Modelo – Caso 3	33
Figura 4.6 – Perfil de temperatura da Estrutura 1	36
Figura 4.7 - Perfil de temperatura da Estrutura 2.....	36
Figura 4.8 - Perfil de temperatura da Estrutura 3.....	37
Figura 4.9 - Perfil de temperatura da Estrutura 4.....	38
Figura 4.10 – Arrefecimento ao longo do tempo da Estrutura 1	39
Figura 4.11 – Arrefecimento ao longo do tempo na Estrutura 2	39
Figura 4.12 - Arrefecimento ao longo do tempo na Estrutura 3	40
Figura 4.13 - Arrefecimento ao longo do tempo na Estrutura 4	40
Figura 4.14 – Arrefecimento ao longo do tempo para variação da T_{ar} – Estrutura 1	43

Figura 4.15 - Arrefecimento ao longo do tempo para variação da T_{ar} – Estrutura 2	43
Figura 4.16 - Arrefecimento ao longo do tempo para variação da T_{ar} – Estrutura 3	44
Figura 4.17 - Arrefecimento ao longo do tempo para variação da T_{ar} – Estrutura 4	44
Figura 4.18 - Arrefecimento ao longo do tempo para variação da T_{ar} e T_{base} – Estrutura 1	47
Figura 4.19 - Arrefecimento ao longo do tempo para variação da T_{ar} e T_{base} – Estrutura 2	48
Figura 4.20 - Arrefecimento ao longo do tempo para variação da T_{ar} e T_{base} – Estrutura 3	48
Figura 4.21 - Arrefecimento ao longo do tempo para variação da T_{ar} e T_{base} – Estrutura 4	49
Figura 4.22 – Arrefecimento ao longo do tempo com variação da velocidade do vento – Estrutura 1	50
Figura 4.23 - Arrefecimento ao longo do tempo com variação da velocidade do vento – Estrutura 2	51
Figura 4.24 - Arrefecimento ao longo do tempo com variação da velocidade do vento – Estrutura 3	51
Figura 4.25 - Arrefecimento ao longo do tempo com variação da velocidade do vento – Estrutura 4	52
Figura 4.26 - Arrefecimento ao longo do tempo com variação da nebulosidade – Estrutura 1	54
Figura 4.27 - Arrefecimento ao longo do tempo com variação da nebulosidade – Estrutura 2	54
Figura 4.28 - Arrefecimento ao longo do tempo com variação da nebulosidade – Estrutura 3	55
Figura 4.29 - Arrefecimento ao longo do tempo com variação da nebulosidade – Estrutura 4	55
Figura 4.30 – Variação da temperatura ao longo do tempo com a T_{ar} afectada pela nebulosidade às 15h	57
Figura 4.31 - Variação da temperatura ao longo do tempo com a T_{ar} afectada pela nebulosidade às 8h	58
Figura 4.32 – Arrefecimento ao longo do tempo com variação da temperatura de aplicação – Estrutura 1	59
Figura 4.33 – Arrefecimento ao longo do tempo com variação da temperatura de aplicação – Estrutura 2	60
Figura 4.34 – Arrefecimento ao longo do tempo com variação da temperatura de aplicação – Estrutura 3	60
Figura 4.35 – Arrefecimento ao longo do tempo com variação da temperatura de aplicação – Estrutura 4	61
Figura 4.36 – Arrefecimento ao longo do tempo com variação das propriedades dos materiais – Estrutura 1	62
Figura 4.37 – Arrefecimento ao longo do tempo com variação das propriedades dos materiais – Estrutura 2	63
Figura 4.38 – Arrefecimento ao longo do tempo com variação das propriedades dos materiais – Estrutura 3	64
Figura 4.39 – Arrefecimento ao longo do tempo com variação das propriedades dos materiais – Estrutura 4	64
Figura 4.40 – Variação da condutibilidade térmica com a temperatura e massa volúmica	65
Figura 4.41 – Temperaturas após a compactação	66
Figura 4.42 – Arrefecimento ao longo do tempo com compactação e variação das propriedades dos materiais – Estrutura 1	67

Figura 4.43 – Arrefecimento ao longo do tempo com compactação e variação das propriedades dos materiais – Estrutura 2.....	68
Figura 4.44 – Arrefecimento ao longo do tempo com compactação e variação das propriedades dos materiais – Estrutura 3.....	68
Figura 4.45 – Arrefecimento ao longo do tempo com compactação e variação das propriedades dos materiais – Estrutura 4.....	69

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1– Resumo das opções de cálculo tomadas por outros autores	15
Quadro 2.2 – Características térmicas dos materiais de pavimentação	16
Quadro 4.1 – Características térmicas dos materiais	30
Quadro 4.2 – Casos considerados na validação	32
Quadro 4.4 – Características geométricas e térmicas da estrutura.....	42
Quadro 4.5 – Tempo disponível para a compactação e abertura ao tráfego variação de T_{ar}	45
Quadro 4.6 - Tempo disponível para a compactação e abertura ao tráfego variação de T_{ar}	53
Quadro 4.7 – Variação da temperatura do ar com a nebulosidade	57
Quadro 4.8 – Características geométricas e térmicas dos materiais antes da compactação	66

Lista de siglas e símbolos

Siglas

ABGE	Agregado britado de granulometria extensa
BB	Betão Betuminoso
IR	Temperatura superficial medida por raios infravermelhos
SMA	<i>Stone mastic asphalt</i>

Símbolos

A	Área da secção
B_i	Número de Biot
E_{in}	Fluxo de calor que entra
E_{out}	Fluxo de calor que sai
E_{st}	Variação da energia no elemento
F_o	Número de Fourier
G_{iot}	Quantidade de energia solar incidente
G_D	Radiação solar directa
G_d	Radiação solar difusa
G_{atm}	Energia solar atmosférica
N	Nebulosidade
Q	Quantidade de calor
Q_{conv}	Quantidade de calor por convecção
Q_{cond}	Quantidade de calor por condução
T	Temperatura do elemento
T_{ar}	Temperatura do ar
T_{atm}	Temperatura da atmosfera
T_{pav}	Temperatura do pavimento
T_{mb}	Temperatura média mensal
T_{mma}	Temperatura média mensal do ar
a	Difusividade térmica
c	Capacidade calorífica
h_c	Coeficiente de convecção
h_r	Tempo decimal
j	Número de dias a partir de dia 1 de Janeiro
q	Fluxo de calor
q_x	Fluxo de calor na direcção x
q_{conv}	Fluxo de calor por convecção
q_{cond}	Fluxo de calor por condução
r	Fluxo de calor por radiação
V_{vento}	Velocidade do vento
z	Profundidade
Δt	Intervalo de tempo

Lista de siglas e símbolos

Δx	Espaçamento entre nós
α	Coeficiente de absorção
ε	Emissividade de um corpo
Θ	Ângulo de incidência da luz solar
σ	Constante de Stefan-Boltzmann

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do tema

A compactação de misturas betuminosas, sendo a última etapa de construção de um pavimento rodoviário, assume uma grande importância para o seu desempenho futuro. As autoridades rodoviárias actualmente como forma de controlar a qualidade dos pavimentos recorrem a "especificações de produto final", que consistem na verificação de valores como a baridade e a porosidade após a construção do pavimento, desta forma pretendem assegurar que o material, em utilização, corresponda as exigências de qualidade previstas no dimensionamento.

Sabendo que a compactação tem como objectivo tornar as misturas betuminosas resistentes às cargas a que vai ser exposto em utilização, sem deformações que comprometam a sua estrutura e sem fendilhamento prematuro, importa garantir que esta etapa da construção do pavimento seja executada nas melhores condições possíveis.

Neste processo, a experiência de construção e de alguns estudos revelam que as misturas betuminosas, independentemente das suas características, não devem ser compactadas abaixo de 90°C de temperatura, sob pena de comprometerem irremediavelmente o desempenho do pavimento. Isto deve-se ao facto de a temperaturas mais baixas a viscosidade, que é função da temperatura, tomar valores elevados que já não promovem a compactação adequada (Micaelo, 2009).

Esta temática, pela importância e variantes que a compõem, tem sido alvo de alguns estudos e revela ainda algumas lacunas que merecem ser investigadas para melhor compreensão dos processos de arrefecimento tendo em conta as características do material, quantidade e condições ambientais aquando da aplicação das misturas.

1.2. Objectivo

Neste trabalho pretende-se analisar o comportamento térmico das misturas betuminosas após a aplicação no pavimento. Desta forma, pretende-se construir um modelo de cálculo que permita aproximar da melhor forma o arrefecimento do material e indique o tempo disponível para a compactação.

Está também estabelecido como objectivo complementar o estudo desenvolvido por (Micaelo, 2009) onde se conhecem melhor as variáveis que influenciam uma compactação adequada. Acompanhando o estudo desenvolvido por (Pilate, 2007), e focando a análise no arrefecimento apenas para a compactação, serão considerados os processos de transmissão de calor por condução, convecção e radiação (Henriques, 2011).

O modelo proposto servirá para ajudar a prever a janela de tempo em que a mistura betuminosa está em boas condições de ser compactada.

1.3. Metodologia

Na primeira fase deste trabalho apresenta-se a revisão bibliográfica no sentido de procurar reunir o máximo de informações já disponíveis para este tema, quer a nível de desenvolvimento do modelo como também em termos de comportamento térmico.

Numa fase seguinte foi acompanhado o desenvolvimento do trabalho realizado por Olivier Pilate (Pilate, 2007), percebendo quais as premissas que o compõem, pois este modelo terá um desenvolvimento muito próximo da temática abordada por este autor. Após essa análise foi necessário reunir a informação sobre transmissão térmica e definir as equações que darão forma ao modelo. Foi então desenvolvido o modelo com base nas equações de transmissão de calor com base no método energético, implementadas no software informático MATLAB®.

Após a conclusão da modelação foi necessário definir os casos reais de construção dos pavimentos em Portugal. A definição destes parâmetros pretende que o cálculo dê resposta graficamente e o mais próximo da realidade do processo de arrefecimento das misturas betuminosas aplicadas, tendo em conta as condições em que são aplicadas.

1.4. Estrutura do documento

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo este a introdução.

No segundo capítulo é feita a revisão bibliográfica sobre a compactação das misturas betuminosas, os fenómenos físicos que dizem respeito à transferência de calor e métodos de calcular o seu arrefecimento logo após a colocação.

No terceiro capítulo desenvolve-se o modelo de previsão tratado neste trabalho, com base nas equações de transmissão de calor, se justifica e desenvolve o modelo e o método utilizado no cálculo, método do equilíbrio energético.

No quarto capítulo define-se a aplicação do modelo desenvolvido no terceiro capítulo, aplicando-o a casos reais de pavimentos rodoviários. Neste sentido, são especificadas não só as variáveis impostas pelo modelo como também a sua aplicação, combinando-se os factores que interferem no arrefecimento de uma camada de mistura betuminosa. São feitas análises comparativas para se compreender de que modo este modelo serve os objectivos definidos para esta dissertação.

No quinto e último capítulo são feitas as considerações finais relativamente ao modelo desenvolvido e às conclusões obtidas. Em último lugar é feita uma proposta de desenvolvimento futuro no âmbito desta dissertação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução

Este capítulo é dedicado à revisão bibliográfica, no qual uma parte contém uma breve abordagem à definição da compactação e do seu objectivo, e outra parte é dedicada à revisão dos fenómenos físicos que explicam o arrefecimento das misturas betuminosas. A definição dos processos de compactação é sucinta tendo em conta que o principal objectivo desta dissertação é a previsão de tempo útil para a ocorrência da mesma. Desta forma, estão descritos os processos de transmissão térmica que caracterizam o modelo de cálculo e o método numérico implementado em linguagem MATLAB®.

2.2. Compactação de misturas betuminosas

2.2.1. Pavimentação

Neste subcapítulo importa descrever de forma simplificada e na sua globalidade o processo construtivo de um pavimento. A pavimentação é uma das principais etapas do projecto de uma estrada, é necessário ter em conta as condicionantes que implicam a sua concepção, (condicionantes técnico-geométricas, condicionantes que dizem respeito às características da região, etc). Para uma abordagem simples um pavimento rodoviário pode ser definido como uma sobreposição de camadas horizontais que suportarão as cargas provocadas pelos veículos que nele circulam e as transmitirão à sua fundação, quer seja o solo uma ponte ou outro tipo de estrutura. Esta definição engloba uma grande variedade de estruturas de pavimentos em que o betume é o ligante da mistura, daí a designação de “pavimentos betuminosos” adoptada para pavimentos aplicados na construção rodoviária (Pérez & Soto, 2006).

Para esta breve explicação do processo de concepção de uma estrutura rodoviária considere-se a estrutura da Figura 2.1.

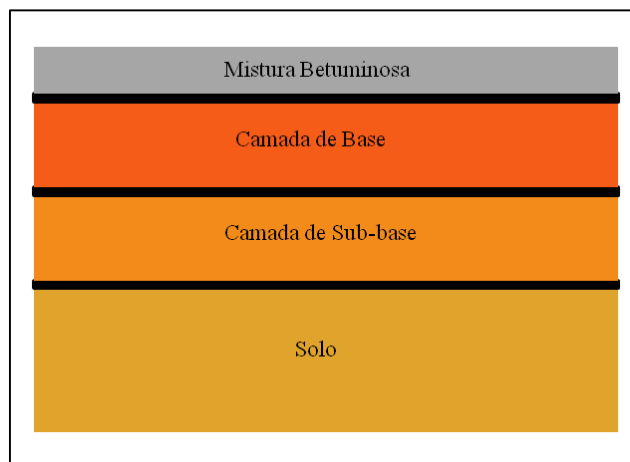


Figura 2.1 – Estrutura de pavimento rodoviário

Depois de garantida a limpeza e a rega de colagem, a aplicação da mistura betuminosa deve-se considerar o fabrico, transporte, espalhamento e compactação ou cilindramento. O fabrico é garantido por centrais adequadas, sob o controlo da fiscalização, e o transporte realizado de forma a garantir que se cumprem as temperaturas especificadas no caderno de encargos. É essencial garantir que os limites de temperatura são cumpridos, para diminuir ao máximo a possibilidade de ocorrência de segregação dos materiais, pondo em causa tanto o seu espalhamento como a sua compactação em condições que permitam chegar aos níveis de qualidade exigidos. A experiência indica que as misturas betuminosas a quente devem ser compactados para temperaturas superiores a 90-100°C, sob pena de não ser atingida uma compactação adequada (Micaelo, 2009). Para isso existem equipamentos disponibilizados por várias marcas comerciais que garantem a execução dos trabalhos com grande fiabilidade. Para o espalhamento das misturas betuminosas é usada a pavimentadora, Figura 2.2.



Figura 2.2 – Pavimentadora - (Dynapac, 2014)

As pavimentadoras realizam a colocação e compactação inicial da mistura betuminosa numa camada com dimensões predefinidas (largura e espessura) assim como a inclinação transversal ao longo da extensão pretendida (Micaelo, 2009). A transferência do material betuminoso do camião que a transporta para a pavimentadora é um ponto crítico no que diz respeito à conservação das temperaturas de aplicação, pelo que, recorrer a equipamentos de transferência (Figura 2.3) que fazem a transição do camião para a pavimentadora, vulgo alimentador móvel (Figura 2.4), assegura uma maior qualidade do ponto de vista térmico a estas manobras em obra.



Figura 2.3 - Equipamento de transferência de misturas betuminosas (Alimentador móvel) – (Dynapac, 2014)



Figura 2.4 – Execução em obra da transferência de misturas betuminosas (Adaptado de (Dynapac, 2014))

Por fim, na fase de compactação os equipamentos usados são os cilindros. Existem vários tipos de equipamentos nesta categoria, nomeadamente cilindros de pneus, cilindros de rasto liso e vibradores e cilindros de rasto liso estático. Os cilindros vibradores de rasto liso (Figura 2.5) atingem os níveis de qualidade superficial e de compactação dos cilindros estáticos com menos passagens.



Figura 2.5 – Cilindro vibrador tandem – (Dynapac, 2014)

2.2.2. Definição de compactação

Através deste processo a mistura betuminosa, que inicialmente apresenta um estado solto (contendo muito ar na sua composição), sendo pressionada pelas passagens dos cilindros, passa a apresentar um estado mais denso. Esta modificação no material torna possível que em serviço sejam suportadas as cargas impostas pela circulação dos veículos, sem deformações que comprometam a estrutura do pavimento.

2.2.3. Objectivo da compactação

No seguimento do que foi dito anteriormente, durante a compactação as partículas de agregado revestidas de betume são pressionadas umas contras as outras, reduzindo os vazios e aumentando a baridade da mistura betuminosa (Micaelo, 2009). A alteração provocada por este processo aumenta o atrito interno das partículas, diminui também a porosidade da mistura betuminosa e garante desta forma que esta camada de desgaste não seja compactada pelas cargas a que for sujeita no futuro, o que poderia criar situações de assentamentos diferenciais no pavimento, pondo em causa a segurança dos utentes. Com este processo é também garantida a impermeabilidade da camada, assegurando que a infiltração de água através da camada de desgaste não compromete a fundação do pavimento, e degradação precoce do pavimento.

2.2.4. Tempo disponível para a compactação

Como já foi referido anteriormente, as misturas betuminosas a quente, de forma geral têm o seu limite de temperatura disponível para a compactação acima dos 90°C, a partir da experiência de campo e de estudos científicos. Quando a temperatura das misturas betuminosas é inferior a este nível a viscosidade do betume é elevada pelo que a compactação é dificilmente obtida.

O arrefecimento da camada de betume aplicada, depende fundamentalmente da espessura, e da temperatura ambiente, que por outro lado influencia a temperatura de base em que se coloca a camada. Estes factores são, juntamente com a velocidade do vento, quantificados no que ao arrefecimento diz respeito uma vez que a experiência indica como sendo o que mais influencia o tempo disponível para a compactação.

O tempo disponível para a compactação corresponde ao período de tempo entre a pavimentação e a temperatura a que a mistura betuminosa perde a capacidade de ser compactada de forma eficaz (Micaelo, 2009). Na Figura 2.6 podemos observar o arrefecimento de duas camadas após a pavimentação com diferentes espessuras: conforme esperado, verifica-se que o arrefecimento é substancialmente mais lento quando a camada de betume é mais espessa. Na camada mais fina, o tempo disponível para a compactação é aproximadamente 5 minutos e que nos limites da camada as perdas, nos primeiros minutos, são significativamente maiores do que no interior da camada. Por outro lado a camada mais espessa revela uma maior resistência nas transferências térmicas, proporcionando um intervalo de tempo para a compactação maior.

Posto isto, é fundamental perceber os fenómenos físicos que estão subjacentes a este tipo de transmissão térmica entre a camada de mistura betuminosa, após a aplicação, e as condições do ambiente envolvente.

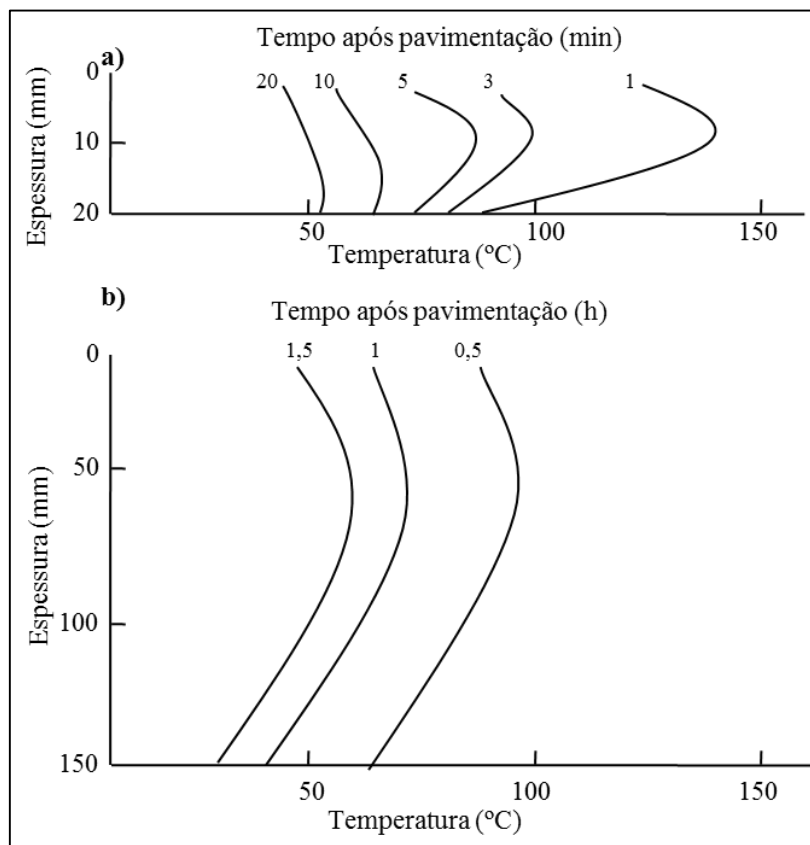


Figura 2.6 – Variação da temperatura ao longo da camada para diferentes espessuras
(a) Espessura de 20mm; b) Espessura de 150mm)

(Çengel, 1998)

2.3. Fenómenos físicos

Considerando que o objectivo deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo de previsão do intervalo de tempo disponível para a compactação, surge a necessidade de identificar e caracterizar os fenómenos físicos que estão associados às transferências térmicas, associada ao arrefecimento das camadas de misturas betuminosas.

A Figura 2.7 ilustra os fenómenos de troca de calor entre o pavimento e a envolvente, que englobam a condução, para o interior do pavimento, a convecção, por acção do vento, e a radiação solar atmosférica e terrestre.

A termodinâmica refere-se à quantidade de transferência de calor que num sistema passa de um estado de equilíbrio para outro (Çengel, 1997). No caso de estudo, o objectivo está em quantificar o fluxo de calor transferido num determinado intervalo de tempo. Os três mecanismos de transferência de calor são a condução, a convecção e a radiação. A condução é a transferência de calor que surge da interacção entre partículas, sendo o fluxo energético das partículas com a temperatura mais elevada para as adjacentes de menor temperatura. A convecção é a transferência de calor que ocorre entre o elemento sólido (mistura betuminosa) e o ar em movimento, envolvendo uma combinação de condução e convecção. A radiação é o calor/energia emitido pela mistura betuminosa sob a forma de ondas electromagnéticas, como resultado da mudança das composições das moléculas (Çengel, 1997), a radiação existe também sob a forma de radiação atmosférica.

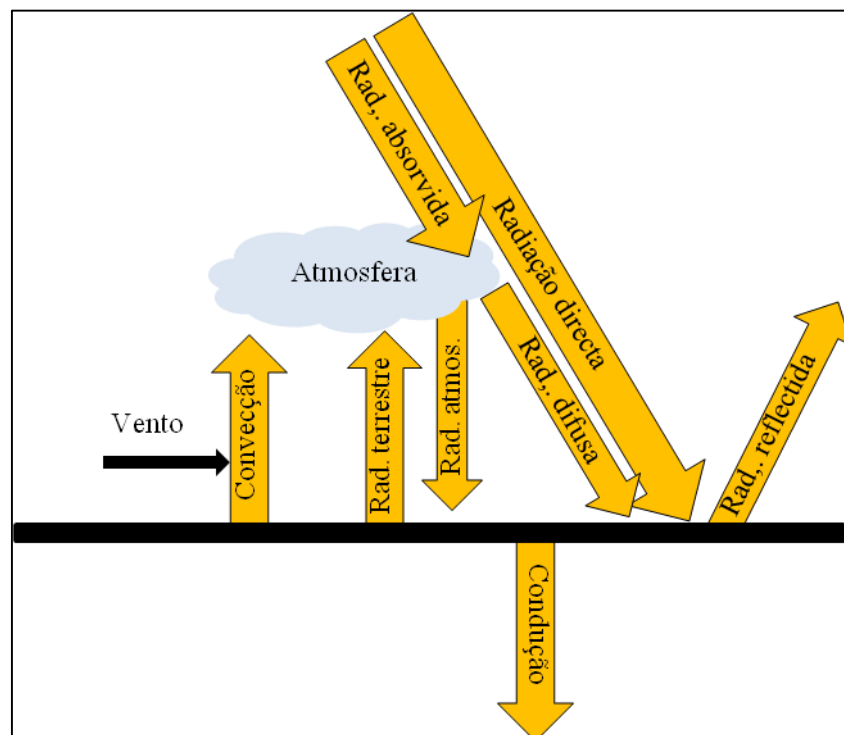


Figura 2.7 – Trocas de calor entre o pavimento e a envolvente (Çengel, 1998)

2.3.1. Transferência de calor por condução

Sendo a transferência de calor por condução, como foi dito anteriormente, o fenómeno que caracteriza a transferência de calor entre duas zonas do material com temperaturas diferentes (Henriques, 2011). Para determinar as transferências de calor por condução através do material podemos usar duas avaliações, a quantidade de calor, Q (W) ou fluxo de calor q (W/m²), que são relacionadas na seguinte forma:

$$q = \frac{Q}{A} \quad (2.1)$$

em que, A (m²) é a área da secção atravessada pelo fluxo de calor.

Biot fez uma avaliação experimental da condução de calor, que foi usada por Joseph Fourier em 1822 para assim formular a teoria analítica de calor. A Lei de Fourier determina que o fluxo de calor numa determina direcção é proporcional ao gradiente de temperatura nessa mesma direcção. Na Figura 2.8 está ilustrado um esquema para melhor percepção do fenómeno, da secção 1 para 2 com temperaturas respectivamente T_1 e T_2 .

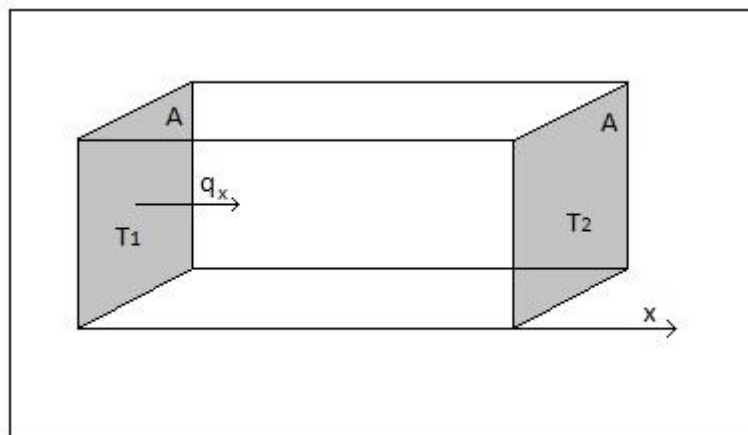


Figura 2.8 – Evolução do fluxo de calor por condução no material (adaptado de (Pilate, 2007))

Tendo em conta a condução unidireccional segundo a direcção x , temos:

$$q_x = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

Em que λ (W/m.°C) é a condutibilidade térmica do material e é neste caso a constante de proporcionalidade. Sendo o sinal (-) indicador de que as transferências de calor ocorrem das temperaturas mais elevadas para as mais baixas. A equação (2.3) que seguidamente é apresentada expressa a equação anterior a nível de quantidade de calor Q :

$$Q_x = q_x \cdot A = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.3)$$

Portanto, o fluxo de calor por condução, q_x , ocorre verticalmente na camada de mistura betuminosa aplicada. Tendo ainda em conta que aquando da aplicação da nova camada de mistura betuminosa alteramos o estado estacionário em que as camadas subjacentes se encontram, passando a ter um regime variável. Este regime pode ser considerado um estado transitório (ou transiente), uma vez que não é mais que a variação de estados ao longo do tempo no sentido de regressar ao estado estacionário, onde não ocorrem alterações significativas ao longo do tempo. Por isto, importa obter a expressão do fluxo de calor transitório unidirecional. A partir da equação (2.4) obtém-se:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = \frac{1}{a} \frac{dT}{dt} \quad (2.4)$$

A velocidade do fluxo de calor corresponde à difusividade térmica, a (m^2/s), que depende da condutividade térmica λ , da capacidade calorífica c ($J/Kg.^{\circ}C$), que é a energia necessária para elevar em $1^{\circ}C$ a temperatura do material, e da massa volúmica do material ρ (Kg/m^3). A velocidade de fluxo é obtida pela seguinte expressão:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (2.5)$$

Para prever as trocas de calor por condução é necessário o conhecimento de no mínimo duas propriedades térmicas do material. Em (Pilate, 2007; Wolfe & Heath, 1983; Chadbourn *et al*, 1998) é apresentada uma pesquisa bibliográfica, onde são resumidos valores das propriedades para diversos materiais com base em fontes bibliográficas e/ou resultados laboratoriais. Importa referir que neste trabalho se procura uma solução numérica que dê resultados próximos da realidade com base nas propriedades dos materiais e nas condições atmosféricas durante a aplicação.

2.3.2. Transferência de calor por convecção

A transferência de calor por convecção, como foi dito anteriormente, é um mecanismo que inclui a troca de calor entre um corpo sólido e um fluido, que no caso em estudo, corresponde à interface do pavimento e do ar. A existência de movimento nas moléculas de ar provocado pelo vento, faz com que exista uma incrementação no que toca às trocas térmicas entre o pavimento e o ar, pelo que, no caso estudado estamos perante um mecanismo de convecção forçada.

Na Figura 2.9 está uma representação do que foi descrito, onde se pode perceber o fenómeno de convecção forçada. Onde, v_{vento} representa a velocidade do vento (m/s); T_{ar} a

temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$); T é a temperatura do pavimento ($^{\circ}\text{C}$); Q_{cond} é a quantidade de calor transferida por condução; Q_{conv} a quantidade de calor transferida por convecção.

O fluxo de calor por convecção, q_{conv} , entre a superfície do pavimento, à temperatura T ($^{\circ}\text{C}$), e o ambiente, à temperatura T_{ar} ($^{\circ}\text{C}$). Para isso recorremos à lei do arrefecimento de Newton:

$$q_{\text{conv}} = h_c (T - T_{\text{ar}}) \quad (2.5)$$

em que, h_c é o coeficiente de convecção ou, por alguns autores, condutância térmica superficial por convecção.

Para fazer a análise através da quantidade de calor, Q_{conv} , basta incluir a área da superfície, A , como na equação (2.6).

$$Q_{\text{conv}} = h_c A (T - T_{\text{ar}}) \quad (2.6)$$

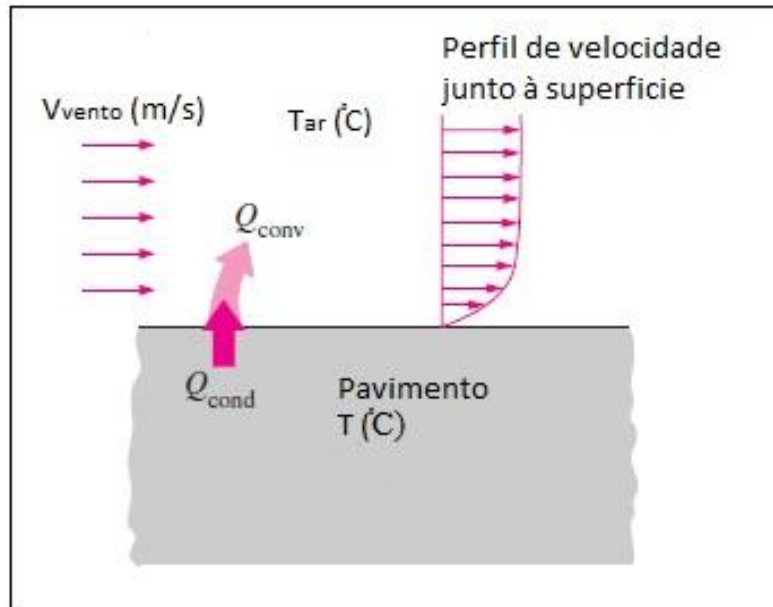


Figura 2.9 – Arrefecimento do pavimento por convecção forçada (adaptado de (Çengel, 1998))

Neste processo existe uma camada de ar que fica aderente à superfície do pavimento, na qual ocorrem as transferências térmicas por condução. Assim, é possível relacionar os dois fluxos através da lei de arrefecimento de Newton (também referida por condição de Fourier por alguns autores) (Pilate, 2007).

$$-\lambda \frac{dT}{dx} = h_c (T - T_{\text{ar}}) \quad (2.7)$$

Esta expressão estabelece que o balanço energético entre o pavimento e o ambiente é caracterizado por uma igualdade entre o fluxo de calor por condução no interior do pavimento e o fluxo de convecção entre o pavimento e o ambiente (Henriques, 2011).

2.3.3. Transferência de calor por radiação

A radiação caracteriza-se pelo tipo de transferência de energia térmica emitida por ondas ou partículas, propagando-se através de misturas gasosas, não sendo necessário material para programação deste tipo de energia. Uma superfície exposta ao sol está sujeita a três formas de transferência de calor por radiação: solar, atmosférica e terrestre. Importa também ter em conta o comportamento e as características da superfície que é atingida por este tipo de energia, no caso de estudo temos o pavimento em mistura betuminosa, que é uma superfície opaca, pelo que a radiação que incide na superfície será transformada em energia absorvida e reflectida pela superfície, como é representado na Figura 2.10.

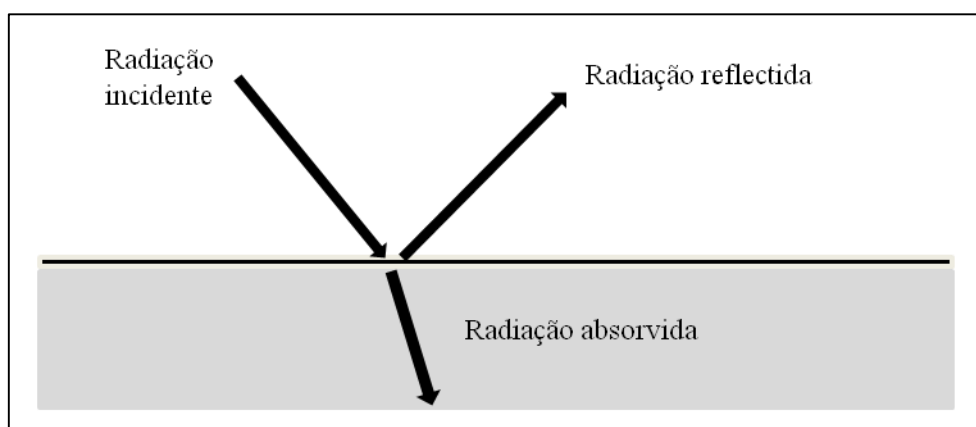


Figura 2.10 – Radiação na superfície do pavimento

Entende-se radiação solar a energia que o sol emite e que é recebida como energia de radiação por qualquer superfície na Terra, a quantidade de energia de radiação que a superfície da Terra recebe surge sob duas formas: radiação directa e radiação difusa. A radiação directa é o fluxo de radiação que atinge a superfície terrestre atravessando a atmosfera sem sofrer dissipações significativas e é transmitida num determinado ângulo limitado pelo disco solar (Micaelo, 2009). A radiação difusa, por outro lado, é a radiação que sendo dissipada pela atmosfera, pois é absorvida pelo oxigénio, ozono, dióxido de carbono e vapor de água, considera-se atingir uniformemente a superfície terrestre.

A energia solar que atinge a superfície terrestre é condicionada por diversos factores, alguns que têm a ver com a revolução da terra, nomeadamente a distância ao sol, a rotação e a inclinação do eixo do planeta, que pode ser melhor entendida na Figura 2.11. A Terra gira em torno do Sol numa órbita elíptica que atravessa o plano da órbita do planeta, conhecido por plano da elíptica, como a excentricidade da elipse é de aproximadamente 1,7%, a variação da distância entre a Terra e o Sol

não varia muito da distância média. Outro factor contemplado na Figura 2.11 é a constante inclinação de $23^{\circ}27'$ do plano da elíptica em relação ao plano equatorial terrestre.

A atenuação que a atmosfera provoca na radiação solar, que já foi referida anteriormente, faz com que num dia claro a radiação que atinge uma superfície na Terra seja cerca de 950 W/m^2 , e diminui muito para dias nublados ou com nevoeiro. Para melhor compreensão, admitindo que está um dia de sol apenas com algumas nuvens a radiação será cerca de 500 W/m^2 sendo que 30 % será radiação difusa. No entanto, se estiver um dia totalmente encoberto sem que seja possível ver o sol, a radiação será cerca de 50 W/m^2 , sendo na totalidade radiação difusa (Henriques, 2011).

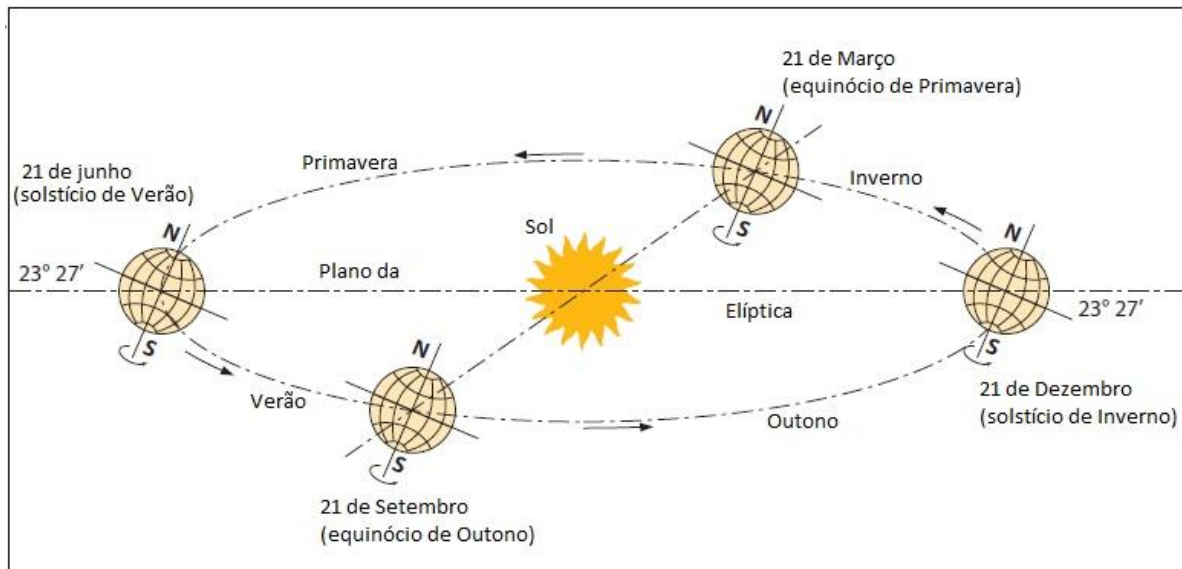


Figura 2.11 – Revolução da terra à volta do Sol
(adaptado de (Dogniaux, 1984))

Posto isto, recorrendo à lei de Lambert para determinar a quantidade de energia total solar incidente, G_{tot} , sobre uma superfície depende do ângulo de incidência da luz solar (Θ), que é a inclinação dos raios solares em relação à superfície, temos em W/m^2 a expressão (2.8), em que G_D é a radiação solar directa e G_d é a radiação solar difusa (Henriques, 2011).

$$G_{tot} = G_D \cos \Theta + G_d \quad (2.8)$$

Contudo, a maior dificuldade está na definição da radiação atenuada pela atmosfera terrestre, que varia com o clima ou com a poluição, por exemplo, do local considerado. Dependendo da zona da Terra e da nublosidade em determinada altura do ano existe uma maior dificuldade em prever a radiação atmosférica. Nesse sentido surge a necessidade de utilizar uma simplificação, e recorrer a uma abstracção física designada por corpo negro.

A noção de corpo negro admite a possibilidade de considerar um corpo que absorve totalmente a radiação solar emitida independentemente do comprimento de onda e da direcção. É aceitável considerar que a atmosfera tem um comportamento próximo do de um corpo negro, e que a

temperatura da atmosfera (T_{atm}) varia aproximadamente entre -40 °C para céu limpo e tempo frio e 12 °C para céu nublado e tempo quente, podendo assim usar a lei de Stefan-Boltzmann:

$$G_{atm} = \sigma T_{atm}^4 \quad (2.9)$$

em que, G_{atm} é a energia solar atmosférica e σ é a constante de Stefan-Boltzmann, com o valor de $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}^4$.

A energia absorvida pelos componentes da atmosfera converte-se em energia radiante com um comprimento de onda elevado, e esse aquecimento das moléculas segundo a lei de Stefan-Boltzmann é proporcional à quarta potência da temperatura, como está expresso na expressão seguinte, onde, se calcula o fluxo de calor por radiação r (em W/m^2) entre dois corpos com temperaturas T_1 e T_2 (em °C), com base também na emissividade do corpo (ϵ) e na constante de Stefan-Boltzmann (σ).

$$r = \epsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.10)$$

Como em condições habituais, a temperatura da atmosfera não é muito diferente da temperatura do ar, pela segunda lei de Kirchhoff, podemos considerar o coeficiente de absorção de uma superfície igual ao da emissividade. Podemos por isso considerar que a energia absorvida pelo pavimento exposto à radiação solar é igual à soma entre a radiação emitida pelo sol e a emitida pela atmosfera, balanceando com a que é emitida pelo pavimento. Como na expressão (2.11), para as temperaturas T_{atm} , da atmosfera e T_{pav} a temperatura do pavimento é possível determinar o fluxo de calor por radiação.

$$r = \alpha G_{tot} + \epsilon \cdot \sigma \cdot T_{atm}^4 - \epsilon \cdot \sigma \cdot T_{pav}^4 \quad (2.11)$$

Simplificando,

$$r = \alpha G_{tot} + \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_{atm}^4 - T_{pav}^4) \quad (2.12)$$

sendo α o coeficiente de absorção do material e sabendo que o pavimento reflecte 10 a 20% da radiação solar e atmosférica recebida, pelo que o valor de α poderá ser considerado 0,85 valor médio.

De referir ainda que o balanço entre energia absorvida e emitida está sujeito a variações conforme as circunstâncias na medida em que, a título de exemplo, em períodos nocturnos em que a temperatura da atmosfera for muito inferior à temperatura do pavimento, ocorrerão perdas térmicas muito mais significativas que devem ser tidas em conta.

2.3.4. Modelos existentes

Outros autores estudaram estes fenómenos com base nas transferências de calor, chegando mesmo a desenvolver modelos de cálculos, alguns dos quais deram origem a fórmulas e até mesmo a *softwares* para a previsão do tempo de arrefecimento. Entre eles destacam-se Wolfe & Heath (1983) com o PavCool, Pilate (2007) com EvalTREB LE e Huayang & Kindberg (2000) com o PavComp. Estes métodos de cálculo foram concebidos com base em considerações distintas. O Quadro 2.1 descreve resumidamente as opções de cálculo tomadas do ponto de vista dos fenómenos de transmissão de calor.

Quadro 2.1– Resumo das opções de cálculo tomadas por outros autores
(Micaelo, 2009)

Condução	Convecção	Radiação		
		Solar	Atmosférica	Terrestre
Pavecool - desenvolvido por (Chadbourn, Newcomb, & Voller, 1998) - modelo numérico de diferenças finitas aplicadas a cada uma das N sub-camadas que compõem as camadas do pavimento, com evolução da baridade (predefinida e igualmente distribuída pelas camadas que representam a camada pavimento) e propriedades térmicas (função da temperatura e da baridade). Aplicação à previsão da evolução da temperatura e determinação do tempo disponível para a compactação.				
$\lambda - 0,5 \text{ a } 2,50 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ $c - 800 \text{ a } 1100 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ $\alpha - 0,2 \text{ a } 1,4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ Misturas betuminosas	$h = 7,4 + 6,39 \times V^{0,75}$ $h \text{ (W/m}^2\text{.}^\circ\text{C)}$ $V - \text{velocidade do vento (m/s)}$	$q = a \times G$ $a = 0,85$ $G = \text{Radiação directa}$	Não considerado	$q = \varepsilon \times \sigma \times (T_1^4 - T_2^4)$ $T_1 - \text{temp. da superfície}$ $T_2 - \text{temp. média do ar}$
Modelo desenvolvido por (Wolfe & Heath, 1983) – modelo numérico aplicado à globalidade da camada com constância da baridade e das propriedades térmicas. Aplicação à previsão da temperatura e determinação do tempo disponível para a compactação.				
$\lambda - 1,75 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ $c - 878 \text{ a } 862 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ $\rho - 2,15 \text{ a } 2,50 \text{ g/cm}^3$ Misturas betuminosas	$h = 7,4 + 6,39 \times V^{0,75}$ $h \text{ (W/m}^2\text{.}^\circ\text{C)}$ $V - \text{velocidade do vento (mil/h)}$	Não considerado	Não considerado	Não considerado
EvalTREB LE – desenvolvido por (Pilate, 2007) – modelo numérico aplicado a todas as camadas do pavimento com constância da baridade e das propriedades térmicas. Aplicação à determinação do tempo de arrefecimento para previsão da abertura da via ao tráfego.				
$\lambda - 0,7 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ $c - 880 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ $\rho - 2,40 \text{ g/cm}^3$ Misturas betuminosas	$h = \frac{1,163 \times (4,84 + 3,36 \cdot V) \times 294,16}{(273,16 + T_{ar})}$ $h \text{ (W/m}^2\text{.}^\circ\text{C)}$ $V - \text{velocidade do vento (m/s)}$	$q = a \times G$ $a = 0,85$ $G = \text{Radiação directa + difusa}$	$q = \varepsilon \times \sigma \times (T_{ar} + 273,16)^4$ $\varepsilon - \text{função de } T_{ar} \text{ e da nebulosidade}$	$q = \varepsilon \times \sigma \times (T_{ar} + 273,16)^4$ $\varepsilon - 0,88 \text{ a } 0,95$ $T_s - \text{temp. da superfície}$

No capítulo 4 será feita uma comparação do modelo desenvolvido nesta dissertação com o *software* Pavcool.

2.3.6. Características térmicas dos materiais

No seguimento do que foi descrito anteriormente, as características térmicas necessárias para a modelação do arrefecimento da camada de mistura betuminosa após a aplicação em obra, são a condutibilidade térmica λ (W/m.°C), a massa volúmica ρ (Kg/m³) e o calor específico c (J/Kg.°C).

Estas características permitem definir o comportamento térmico quanto à sua maior ou menor capacidade de conduzir ou armazenar o calor. O conhecimento destas propriedades é muito importante para a definição dos parâmetros na modelação, a fim de testar a sua influência no arrefecimento. Pilate (Pilate, 2007) apresenta uma compilação das características térmicas de alguns materiais, proposto em literatura. No Quadro 2.2 resumem-se os que têm maior interesse para este trabalho assim como as suas fontes.

Quadro 2.2 – Características térmicas dos materiais de pavimentação
(adaptado de (Pilate, 2007))

Materiais	λ (W/m.°C)	c (J/Kg.°C)	ρ (Kg/m ³)	Fonte*
Revestimentos Betuminosos	1,23	921	2230	(Straub <i>et al</i> , 1968)
	0,70	921	2100	(Geest, 1970)
	1,38	1047	2302	(Mauricio, 2001)
	1,05 a 2,00	921	2000 a 2400	(De Backer, 1985)
	0,74 a 0,76	920	1100 a 1500	(Taine & Petit, 2003)
Betão betuminoso	2,00	-	2350	(Frémond <i>et al</i> , 2002)
	2,22	869	-	(ONDLR, 1998)
Macadame	1,51 a 2,17	754 a 837	-	(Philippe, 1967)
	1,31	837	1750	(Straub <i>et al</i> , 1968)
Agregado britado	0,52	838	1703	(Mauricio, 2001)

*Estas referências referem-se ao texto analisado (Pilate, 2007)

3. MODELO DE PREVISÃO

3.1. Introdução

Este capítulo descreve o desenvolvimento do modelo de previsão do tempo disponível para a compactação que se desenvolveu neste trabalho. Iniciou-se com o desenvolvimento dos conceitos teóricos e em seguida concepção por consequência da utilização do método de equilíbrio energético.

3.2. Considerações iniciais na concepção do modelo

3.2.1. Evolução da temperatura na estrutura

Inicialmente foi feita uma abordagem do ponto de vista da estrutura do pavimento que está a ser construído, que no momento antes da aplicação da mistura betuminosa se considera estar em equilíbrio térmico, passando no momento da aplicação da mistura a um estado de desequilíbrio. No momento da aplicação consideramos que a temperatura (T_i), é definida como a temperatura no instante após a aplicação. Na Figura 3.1 é verificada a distribuição inicial da temperatura.

Para restaurar o equilíbrio ocorrem três tipos de trocas de calor:

- Fluxo de calor por condução na camada entre a mistura betuminosa e as camadas subjacentes;
- Fluxo de calor por convecção na superfície do pavimento entre a camada de mistura betuminosa aplicada e o ar;
- Fluxo de calor por radiação na superfície da camada, envolvendo as trocas térmicas de radiação solar, atmosférica e da mistura betuminosa.

O desequilíbrio térmico que mais se aproxima deste tipo de circunstâncias é o regime transitório. Este regime corresponde à evolução de um estado inicial de equilíbrio para outro estado final de equilíbrio. A alteração surge com a modificação no estado inicial das fontes. No caso de estudo é precisamente isso que acontece com a aplicação de uma nova camada a uma temperatura significativamente superior, que vai impor fluxos térmicos até encontrar de novo um estado de equilíbrio.

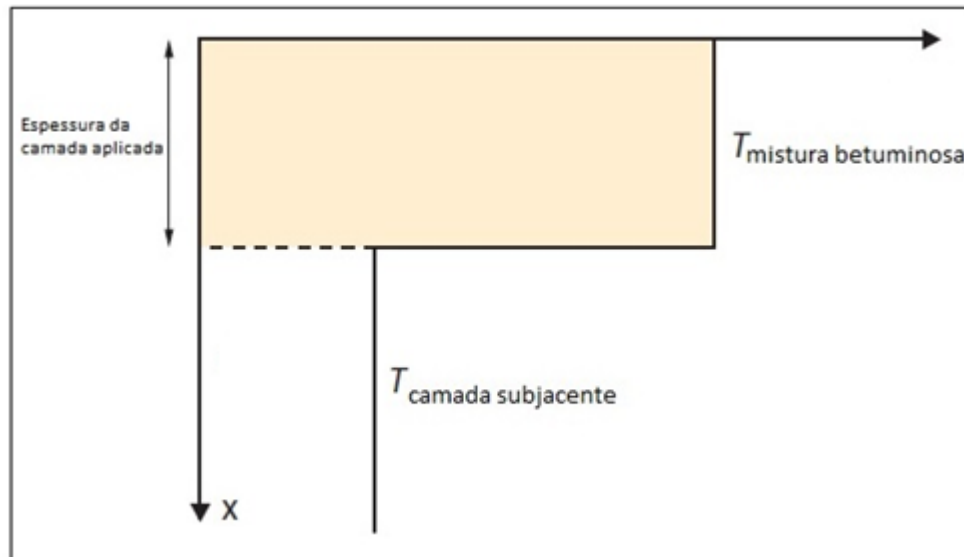


Figura 3.1 – Distribuição inicial da temperatura
(adaptado de (Pilate, 2007))

3.2.2. Dados de entrada

Os dados de entrada do modelo a desenvolver são os seguintes:

- Espessura da camada de mistura betuminosa aplicada (cm);
- Coeficiente de transmissão térmica da mistura betuminosa ($W/(m \cdot ^\circ C)$);
- Coeficiente de transmissão térmica do material subjacente ($W/(m \cdot ^\circ C)$);
- Temperatura inicial de aplicação ($^\circ C$);
- Temperatura do ar ($^\circ C$);
- Temperatura da camada subjacente ($^\circ C$);
- Velocidade do vento (m/s);
- Radiação solar (W/m^2).

3.2.3. Dados de saída

Os dados de saída que serão obtidos de forma gráfica são os seguintes:

- Perfil das temperaturas dentro das duas camadas num instante de tempo determinado;
- Temperatura no interior das camadas ao longo do tempo.

Estes dados são obtidos com o objectivo de fazer uma leitura gráfica do que ocorre dentro das camadas ao longo do processo de arrefecimento.

3.2.4. Temperatura do ar

A temperatura do ar poderá ser considerada com base nas previsões ou normais climatológicas do Instituto Português do Mar e da Atmosféra. As temperaturas médias mensais medidas nas várias estações e climatológicas espalhadas pelo país, com dados recolhidos entre 1981 e 2010, podem ser consultadas no sítio www.ipma.pt. Estes dados revelam-se uma mais-valia na hora de testar o modelo para as diferentes condições temperaturas ao longo do ano e de todo o território português. Na Figura 3.2 é possível consultar a temperatura média mensal do ar na estação de Vila Real entre os anos 1981 e 2010.

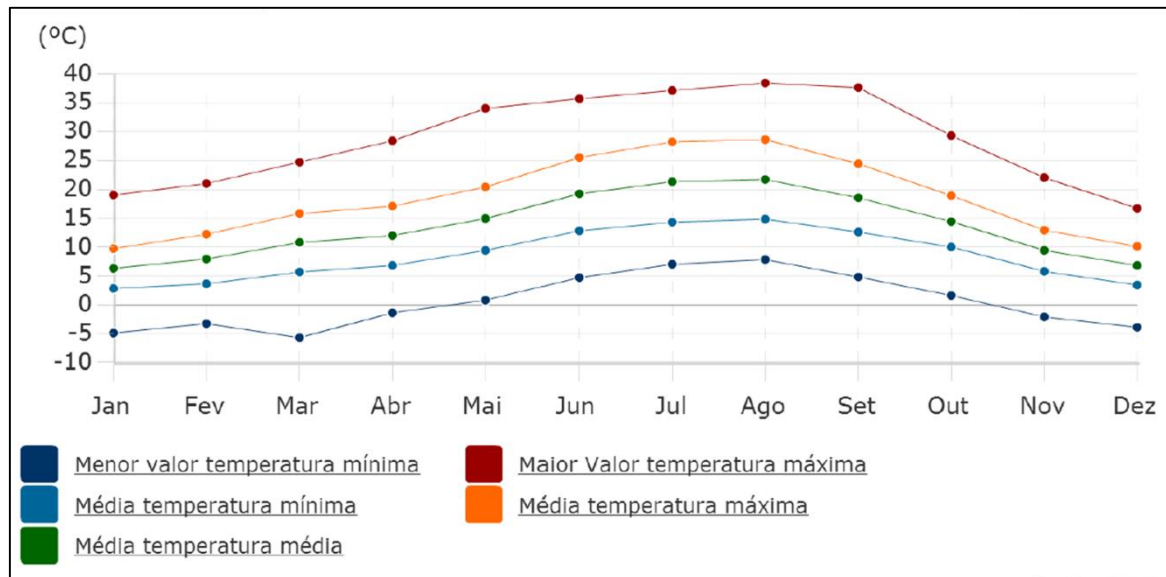


Figura 3.2 – Média da temperatura média mensal, estação de Vila Real (adaptado de (ipma, 2014))

É possível ainda consultar a maior e menor temperatura do ar atingida ao longo dos anos assim como a média das mesmas. Estes valores ajudam a ter a noção de quais as temperaturas atingidas durante o dia e à noite em todos os meses do ano. A pavimentação pode ocorrer em períodos com condições ambiente diferentes.

Para melhor percepção das variações de temperatura do ar em Portugal é possível consultar a Figura 3.3, que fornece os mesmos dados para a cidade de Lisboa e a Figura 3.4 para Faro.

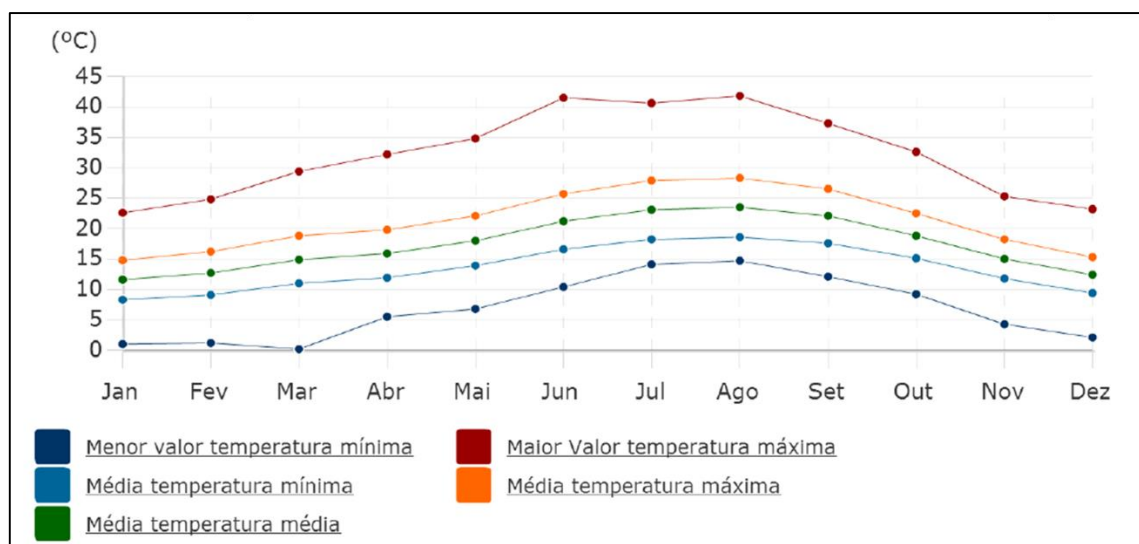


Figura 3.3 - Média da temperatura média mensal, estação de Lisboa
(adaptado de (ipma, 2014))

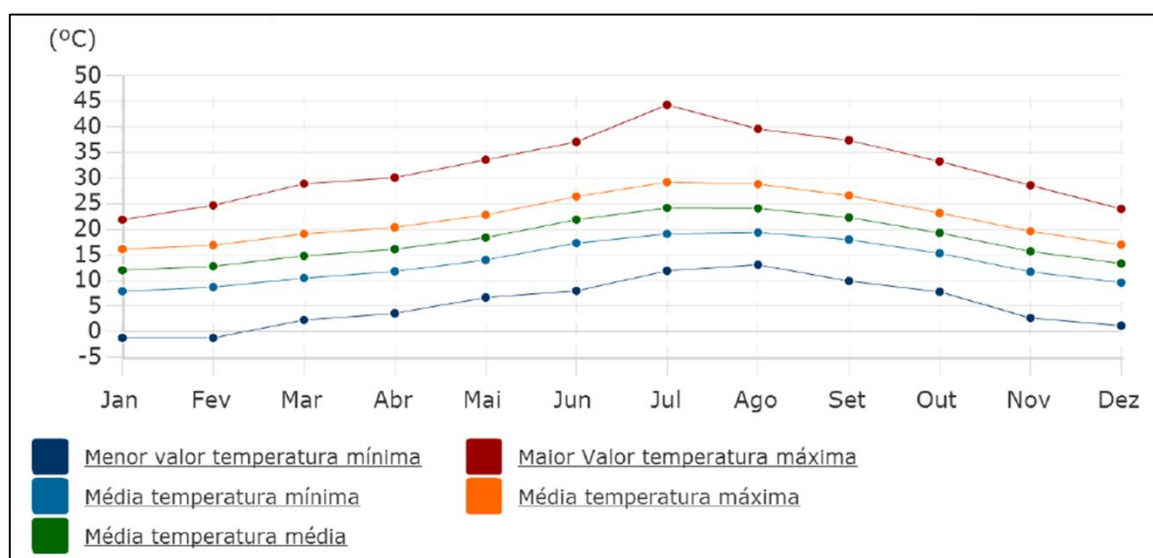


Figura 3.4 – Média da temperatura média mensal, estação de Faro
(adaptado de (ipma, 2014))

Estes valores são importantes para a percepção do desenvolvimento das temperaturas por zonas do país e também por meses do ano, favorecendo a obtenção de dados para uma análise paramétrica, que é também objectivo deste trabalho. No entanto, para uma utilização do modelo aplicando as condições no momento de aplicação da mistura betuminosa, é possível ter acesso aos valores da temperatura do ar com uma precisão garantida pelas previsões (ipma, 2014).

3.2.5. Coeficiente de convecção

O coeficiente de convecção, também referido por alguns autores por condutância térmica superficial por convecção é essencialmente dependente da diferença entre a temperatura do ar e da superfície e da velocidade do vento.

Optou-se por recorrer à relação empírica desenvolvida por (Côté & Konrad, 2001) com validação confirmada para velocidades do vento entre os 0 e 5m/s, mas que já revelou bons resultados para velocidades superiores (Pilate, 2007). A equação 3.1 define o coeficiente de convecção nesta modelação.

$$h_c = \frac{1,163 \cdot (4,84 + 3,36 \cdot v) \cdot 294,16}{(273,16 + T_{ar})} \quad (3.1)$$

Em que v é a velocidade do vento (em m/s) e T_{ar} a temperatura do ar (em °C).

3.3. Modelo de cálculo do tempo disponível para a compactação

3.3.1. Considerações gerais

Nesta secção apresentam-se os fundamentos que estão na base da concepção do modelo de cálculo da temperatura disponível para a compactação. Com base nos conhecimentos dos fenómenos físicos associados às transferências de calor, utilizando o método de equilíbrio energético, podemos, com base nas condições da envolvente, simular o que ocorrerá no processo de arrefecimento da mistura betuminosa aplicada para a pavimentação rodoviária.

Este processo será baseado na lei de Fourier, no que diz respeito à transmissão de calor por condução, assumindo uma condução unidireccional vertical, tendo em conta que a dimensão horizontal da camada é infinitamente superior à dimensão vertical da estrutura. Ainda na condução é considerada a constituição da estrutura do pavimento, sendo o revestimento a camada de mistura betuminosa aplicada e ainda a existência de uma camada subjacente com diferentes propriedades térmicas da primeira. A Figura 3.5 mostra a estrutura considerada nesta modelação.

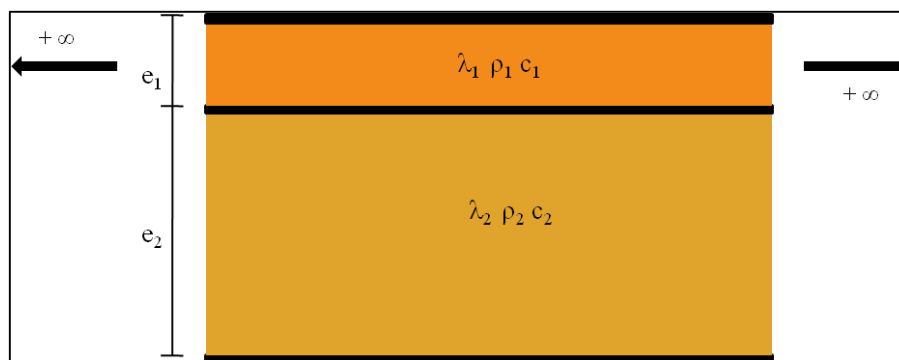


Figura 3.5 – Modelação da estrutura
(adaptado de (Pilate, 2007))

A modelação da estrutura do pavimento foi feita em duas camadas, a existente e com espessura e_2 (cm), com as suas características de condutabilidade térmica λ_2 (W/m.°C), massa volúmica ρ_2 (Kg/m³) e o calor específico c_2 (J/Kg.°C) e a camada superior que se refere à camada de mistura betuminosa aplicada aquando da pavimentação. Note-se que poderia ser adoptado um modelo em que se diferenciariam as várias camadas subjacentes, mas não foi encontrado um fundamento que indique uma grande variação à partida, pelo que foi simplificado desta forma.

Esta abordagem tem ainda como pressuposto que as diferentes camadas da estrutura do pavimento são infinitas no plano horizontal, isotrópicas e homogêneas. A velocidade do vento é considerada constante ao longo de todo o período, a temperatura da camada subjacente é constante, não são considerados os efeitos de bordo para a camada aplicada, ainda que não há conservação do fluxo térmico em nenhum ponto do material, a radiação é apenas considerada nas trocas térmicas na superfície do revestimento do pavimento, não constituindo uma fonte interna de calor, por último não é tida em conta a contribuição para o arrefecimento de água eventualmente existente na superfície.

3.3.2. Interface ar - superfície do pavimento

Como foi dito anteriormente no limite de superfície do pavimento ocorrem os três tipos de interações térmicas entre o pavimento e a envolvente que contribuem para o tempo de arrefecimento: a radiação e a convecção. A radiação solar e atmosférica, a convecção forçada pelo vento e a condução em profundidade como se pode ver pela Figura 3.6.

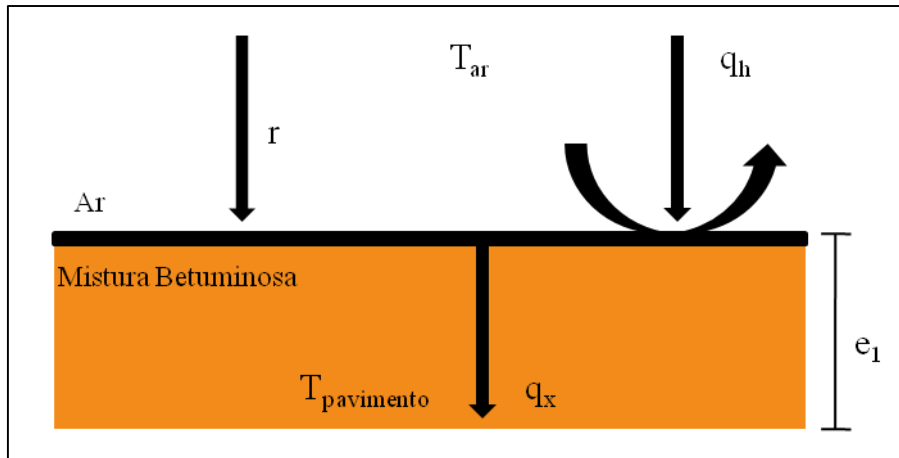


Figura 3.6 – Superfície da mistura betuminosa em contacto com o ar (adaptado de (Pilate, 2007))

Em que T_{ar} é a temperatura do ar e T_{pav} a temperatura do pavimento, q_x o fluxo de condução unidireccional e e_1 , a espessura da camada de betuminoso, r a radiação e q_h o fluxo de calor por convecção. Considerando o equilíbrio de fluxos obtém-se.

$$q_x = q_h + r \quad (3.2)$$

Desenvolvendo, obtém-se:

$$-\lambda \frac{dT}{dx} = h_c(T_{pav} - T_{ar}) + \alpha G_{tot} + \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_{ar}^4 - T_{pav}^4) \quad (3.3)$$

Em quantidade de calor,

$$-\lambda A \frac{dT}{dx} = h_c A (T_{pav} - T_{ar}) + A [G_{tot} + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{ar}^4 - T_{pav}^4)] \quad (3.4)$$

onde A é a área em que o fluxo actua, ou seja no plano horizontal que coincide com a superfície do pavimento, e sendo igual para todos os fluxos de calor.

3.3.3. Fluxo de calor por condução unidireccional

Tendo em conta a condução unidireccional segundo a direcção vertical, a partir da equação (2.2) e separando as variáveis obtém-se,

$$q_x dx = -\lambda dT \quad (3.5)$$

integrando-a entre os limites da camada betuminosa ($x=0$ e $x=\Delta x$) com temperaturas T_1 e T_2 , é obtido,

$$q_x \int_0^{\Delta x} dx = -\lambda \int_{T_1}^{T_2} dT \quad (3.6)$$

esta expressão pode ser simplificado para,

$$q_x (\Delta x - 0) = -\lambda (T_2 - T_1) \quad (3.7)$$

e finalmente obtém-se.

$$q_x = \lambda \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta x} = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3.8)$$

Desta forma resolvemos o carácter diferencial da equação de condução e obtém-se uma aproximação à solução numérica pretendida.

3.3.4. Interface entre duas camadas

Como as camadas de pavimento podem ser de materiais diferentes o que faz com que as suas propriedades térmicas sejam diferentes, o fenómeno de condução entre as duas camadas terá de obedecer à condição de conservação do fluxo de calor. Assim, o fluxo de calor por condução que vem da camada superior terá de ser igual ao fluxo que entra na segunda camada. De outra forma, a temperatura no ponto de contacto entre os dois materiais terá de ser igual. A Figura 3.7 é uma representação da condução térmica entre o material A e B com diferentes condutibilidades térmicas, λ_A e λ_B , respectivamente

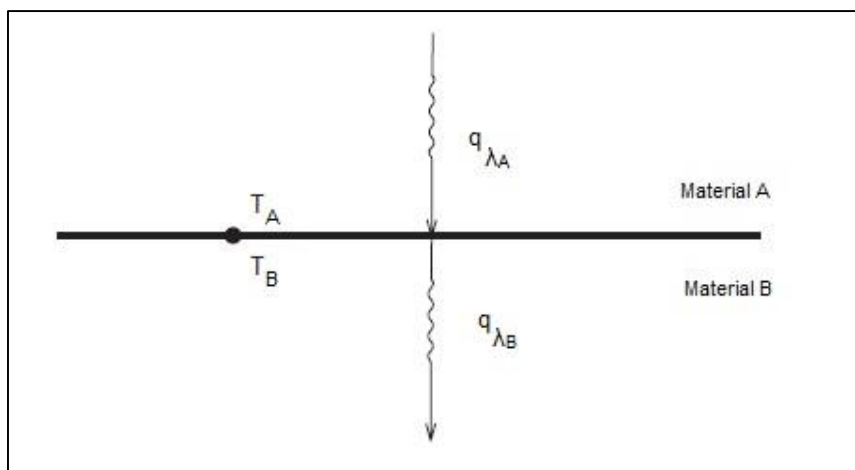


Figura 3.7 – Transferência de calor por condução entre dois materiais diferentes (adaptado de (Pilate, 2007))

$q_{\lambda A}$ e $q_{\lambda B}$ são os fluxos de condução nos dois materiais A e B, respectivamente. O fluxo de calor entre estes dois materiais têm de ser iguais no ponto de contacto ao longo de todo o período.

3.3.5. Método do equilíbrio energético

Os métodos analíticos para a resolução de problemas de transferência de calor são apenas utilizáveis em casos de geometria simples e condições de contorno expressas matematicamente. No caso em análise, estes métodos apresentam dificuldade acrescida de aplicação. Com recurso a métodos numéricos é possível obter uma resolução aproximada, considerada suficiente para o caso em estudo. Para a concepção de um modelo numérico o meio tem de ser discretizado em pontos definidos, com uma distância pré estabelecida entre si, a fim de criar o mais fidedignamente possível a situação real. Nessa medida, foi criada uma rede de nós, como é possível ver na Figura 3.8, com a finalidade de simular a camada de mistura betuminosa aplicada.

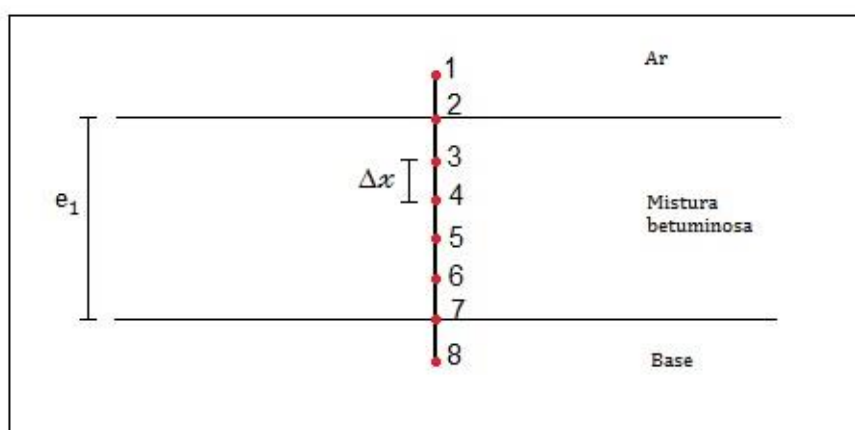


Figura 3.8 – Malha unidireccional da camada de revestimento

Δx é o espaçamento entre os nós e e_1 a espessura total da camada aplicada. Para concretizar a utilização do método do equilíbrio energético na resolução deste problema, e a título de exemplo, se for considerado o nó número 4, é sabido que este nó está sujeito a transferência de calor

por condução no processo de desequilíbrio térmico criado pela aplicação da nova camada do pavimento. Os fluxos de calor por condução que são tidos em conta no nó considerado são, o fluxo de 3 para 4 (q_{3-4}) e o fluxo de 5 para 4 (q_{5-4}). Tendo em conta que não existe geração interna de calor a expressão (3.8) traduz o equilíbrio energético global:

$$E_{in} + E_{out} = E_{st} \quad (3.8)$$

sendo que E_{in} representa o fluxo q_{3-4} e E_{out} o fluxo q_{5-4} . E_{st} por sua vez, refere-se à variação de energia no elemento, na direcção x (vertical), em função do tempo e é expressa por (3.9),

$$E_{st} = \rho c \frac{dT}{dt} dx \quad (3.9)$$

Em que ρ é a massa volúmica da mistura betuminosa (Kg/m^3), c o calor específico ($\text{J/Kg.}^\circ\text{C}$), T a temperatura e t é o tempo.

Posto isto fica claro que à semelhança do que é feito com a discretização do espaço, também é necessário executar o mesmo processo com o tempo, definindo assim um intervalo de tempo elementar Δt , que vai tornar possível o estudo da evolução das temperaturas no pavimento ao longo do intervalo de tempo que for estabelecido. O equilíbrio energético em cada nó pode ser expresso como na equação (3.10) no intervalo de tempo Δt .

$$\Delta t \sum_{x=1}^n Q_x = \Delta E_{st} \quad (3.10)$$

Q_x é a quantidade de calor segundo a direcção x que é transmitida para o elemento no intervalo de tempo Δt e ΔE_{st} a variação de energia no material também no mesmo intervalo de tempo.

Nesta análise importa agora definir uma indicação para se poder saber o número de intervalos de tempo considerados, assim sendo assume-se que para o índice $i=0$ se está na condição de início do arrefecimento, como representado na Figura 3.1. Assim, se ΔE_{st} for substituído pela expressão (3.9) na (3.10) e se dividir ambos os termos da equação por Δt , é obtida a seguinte expressão,

$$\sum_{x=1}^n Q_x = \frac{\rho c V}{\Delta t} (T_n^{i+1} - T_n^i) \quad (3.11)$$

onde V é o volume (m^3), T_n^{i+1} surge como a temperatura no nó n para o intervalo de tempo $t_{i+1}=(i+1)\Delta t$ e T_n^i a temperatura também no nó n no intervalo $t_i = i\Delta t$. Em seguida no âmbito do método de equilíbrio energético é ainda necessário optar por um de dois métodos de apresentação da temperatura que deverá configurar no lado esquerdo da equação. No método explícito usam-se as

temperaturas para o instante i , no método implícito as temperaturas do instante $i+1$. Neste trabalho foi tomada a opção de utilizar o método explícito, obtém-se a expressão.

$$\sum_{x=1}^n Q_x^i = \frac{\rho c V}{\Delta t} (T_n^{i+1} - T_n^i) \quad (3.12)$$

Aplicando estes conceitos ao caso da Figura 3.5, para condução unidireccional, usando o exemplo referido anteriormente do nó 4, com base na equação (3.11) e considerando o volume entre cada nó ($A \cdot \Delta x$), obtém-se a seguinte expressão:

$$\lambda A \frac{(T_3 - T_4)}{\Delta x} + \lambda A \frac{(T_5 - T_4)}{\Delta x} = \rho A \Delta x c \frac{(T_4^{i+1} - T_4^i)}{\Delta t} \quad (3.13)$$

Aplicando a expressão (2.4), que diz respeito à velocidade de fluxo ($a = \lambda / \rho \cdot c$), para simplificar a expressão anterior, fica-se com:

$$T_3 - 2T_4 + T_5 = \frac{\Delta x^2}{a \Delta t} (T_4^{i+1} - T_4^i) \quad (3.14)$$

Note-se que a equação alcançada é equiparada às equações do método das diferenças finitas. Assim aplicando o número de Fourier de acordo com

$$F_o = \frac{a \Delta t}{\Delta x^2} \quad (3.15)$$

Pode-se alcançar uma simplificação da expressão (3.14) da seguinte forma.

$$T_3 - 2T_4 + T_5 = \frac{(T_4^{i+1} - T_4^i)}{F_o} \quad (3.16)$$

Recorrendo ao método explícito, utilizando as temperaturas correspondentes ao instante i , de acordo com a expressão.

$$T_4^{i+1} = F_o (T_3^i + T_5^i) + (1 - 2F_o) T_4^i \quad (3.17)$$

Da mesma forma são obtidas todas as expressões para cada ponto da malha, equilibrando os fluxos de calor.

Assim que estejam definidas as equações para todos os pontos e definido também o intervalo de tempo Δt , assim como todos os parâmetros iniciais e de fronteira, pode-se calcular a temperatura

em todos os nós para o instante $i=0$. Determinando estes valores podem-se determinar as temperaturas para $i+1=i+\Delta t$, sucessivamente desta forma é possível determinar em todos os nós a temperatura ao longo do tempo que for definido.

O exemplo considerado acima tem aplicação em todos os pontos de uma mesma camada, onde a transferência de calor ocorre apenas por condução. A definição das equações para os pontos da malha que estejam no limite da superfície do pavimento e no limite de contacto entre dois materiais diferentes requer a aplicação do mesmo raciocínio, embora tenha de obedecer às condicionantes impostas pela sua localização.

No caso do ponto em contacto com a superfície é necessário ter em conta que o equilíbrio térmico terá a inclusão dos fluxos de calor por convecção e por radiação, na Figura 3.8 o ponto que se encontra nessas condições é o ponto 2, a expressão adquire a formada equação (3.18),

$$Q_{32} + Q_{conv} + \alpha \cdot G_{tot} + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{ar}^{i^4} - T_2^{i^4}) = \rho A \Delta x c \frac{(T_2^{i+1} - T_2^i)}{\Delta t} \quad (3.18)$$

sabendo que a transferência de calor por condução do ponto 3 para o 2 é dada por,

$$Q_{32} = \lambda A \frac{(T_3^i - T_2^i)}{\Delta x} \quad (3.19)$$

e que a transferência de calor por convecção se obtém-se através da equação (3.20),

$$Q_{conv} = h_c A (T_{ar}^i - T_2^i) \quad (3.20)$$

Também, podemos implementar as mesmas simplificações efectuadas acima e adicionar outra com base no factor Bi , número de Biot, uma grandeza adimensional que relaciona a resistência térmica por condução no interior do material com a resistência térmica superficial por convecção do mesmo (Henriques, 2011). Esta grandeza é definida conforme a expressão (3.21).

$$Bi = \frac{h_c \Delta x}{\lambda} \quad (3.21)$$

Posto isto, é possível obter com base na equação (3.18) a expressão que caracteriza as trocas térmicas na superfície do pavimento, considerando o ponto 2 da Figura 3.8.

$$T_2^{i+1} = (1 - 2Fo - 2Fo \cdot Bi)T_2^i + (T_3^i + Bi \cdot T_{ar})2 \cdot Fo + \alpha \cdot G_{tot} + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{ar}^{i^4} - T_2^{i^4}) \quad (3.22)$$

Na transferência de calor entre dois materiais diferentes só existe condução. De acordo com (Incropera *et al*, 2011), para o ponto 7, que é o ponto de contacto entre a camada aplicada e a camada de base, utiliza-se a seguinte expressão,

$$Q_{67} + Q_{87} = (\rho A \Delta x c)_8 \frac{(T_7^{i+1} - T_7^i)}{\Delta t} \quad (3.23)$$

em que os parâmetros que dizem respeito à energia transferida no intervalo de tempo Δt , do lado direito da equação, são os da base (ponto 8). Desenvolvendo a expressão obtém-se a equação que traduz as trocas térmicas entre a camada betuminosa aplicada e a camada de base.

$$T_7^{i+1} = \frac{(\Delta t \cdot \lambda_4)}{(\rho \cdot c \cdot \Delta x^2)_8} (T_6^i - T_7^i) + F_{08} \cdot (T_8^i - T_7^i) + T_7^i \quad (3.24)$$

3.3.6. Critério de estabilidade

Para aplicar o método explícito impõe-se a necessidade de obedecer a um critério de estabilidade relativamente ao intervalo de tempo Δt . Segundo o critério de estabilidade, os coeficientes das temperaturas das expressões desenvolvidas acima têm de ser maiores ou iguais a zero (Henriques, 2011), a qual implica que o coeficiente para o nó da superfície cumpra a condição seguinte.

$$\left(1 - 2Fo - 2Fo \frac{h_c \Delta x}{\lambda}\right) \geq 0 \quad (3.25)$$

Desenvolvendo a expressão, concluímos que o intervalo de tempo Δt terá de cumprir o disposto em

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x^2}{2a(\frac{\Delta x h_c}{\lambda})} \quad (3.26)$$

4. CASO DE ESTUDO

4.1. Considerações gerais

Este capítulo trata da realização da análise paramétrica e comparativa baseada nos resultados obtidos pelo modelo desenvolvido. Com base na estrutura de pavimento previamente definida no capítulo anterior, com duas camadas em análise, é feita uma variação dos parâmetros que caracterizam esta modelação.

Inicialmente é feita a caracterização dos materiais que compõem o pavimento, indicando as suas propriedades físicas, que intervêm nos fenómenos de arrefecimento. Especificamente, a massa volúmica (ρ), calor específico (c) e condutibilidade térmica (λ).

A modelação desenvolvida será, neste capítulo, comparada com o modelo de cálculo da temperatura disponível para a compactação já existente: PaveCool.

Seguidamente será feita a análise paramétrica dos casos de estudo no que diz respeito à temperatura do ar, temperatura de aplicação da mistura betuminosa, variação da velocidade do vento e variação da radiação.

Na fase de aplicação da mistura betuminosa é necessário ter em conta que o material antes da compactação tem propriedades diferentes das que adquire após ser compactada, nomeadamente a espessura, a massa volúmica e a condutibilidade térmica. Com base no conhecimento deste pormenor será feita uma simulação para os casos de antes e após compactação com a variação dos parâmetros referidos no sentido de analisar a influencia que esta alteração das propriedades físicas do material terá no perfil de arrefecimento das misturas.

4.2. Propriedades dos materiais considerados

Nos casos considerados descritos em seguida, são considerados quatro tipos de materiais para execução de pavimentos: duas misturas betuminosas a quente; um agregado betuminoso de granulometria extensa (*ABGE*); e uma mistura betuminosa temperada.

Nas misturas a quente, considere-se a mistura betuminosa do tipo *SMA*, que é uma mistura fechada onde os agregados grossos se encontram envolvidos por um mástique betuminoso rico em betume (Martinho *et al*, 2013). Este tipo de misturas são caracterizadas pelo bom comportamento no que toca à resistência às cargas e apresenta uma durabilidade maior por conta do bom acondicionamento dos agregados que a compõem por parte do betume, em camadas de 3 e 5cm. Os outros dois tipos de misturas a quente também consideradas são do tipo betão betuminoso (*BB*), para os casos de estudo com camadas de desgaste e base. São fabricadas de forma a que todas as partículas dos agregados que as constituem sejam cobertos pelo ligante betuminoso, com a aplicação em obra a temperaturas consideravelmente superiores à da temperatura ambiente.

Para que seja possível desenvolver o cálculo proposto por esta dissertação é necessário definir especificamente os materiais que irão compor a as estruturas do pavimento e conhecer as suas características térmicas. Essas características são dadas no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Características térmicas dos materiais

Material	λ (W/m.°C)	c (J/Kg.°C)	ρ (Kg/m ³)
SMA-C	1,2	921	2400
BB-4C	2,0	869	2350
BB-3D	2,0	869	2350
ABGE	1,3	837	1750

4.3. Comparação com modelos de cálculo existentes

Existem modelos desenvolvidos que têm o propósito de calcular o tempo disponível para a compactação em obra, baseiam-se nos fenômenos de transmissão de calor e também nas condições do ambiente no decorrer da aplicação das misturas. Aqui será feita uma comparação com o *interface* PaveCool.

Fazendo uma parametrização igual para os dois modelos, foi definida uma camada de 5cm de mistura betuminosa do tipo *BB* aplicada em base também do tipo *BB*, no modelo desenvolvido usando as características de *BB-4C* e *BB-3D* do Quadro 4.1, respectivamente. Foi considerada uma temperatura de 18°C para o ar e 15°C para a base, a velocidade do vento moderada de 7m/s (aproximadamente 22Km/h) e admitiu-se que o céu se encontra nublado. A Figura 4.1 mostra as curvas de arrefecimento ao longo da mistura betuminosa aplicada, com o arrefecimento para pontos espaçados de 1cm. Na Figura 4.2 apresenta-se o resultado obtido através do *interface* PaveCool admitindo exactamente as mesmas condições de aplicação que o primeiro.

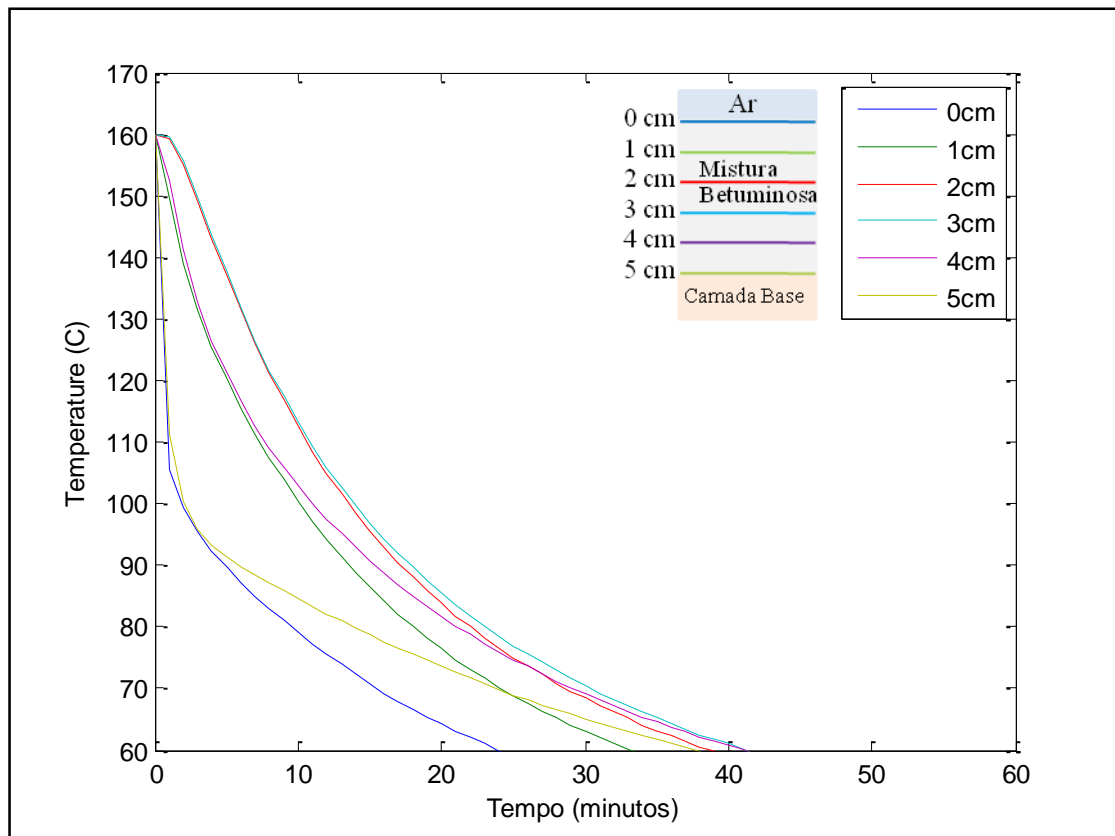


Figura 4.1 – Arrefecimento ao longo do tempo

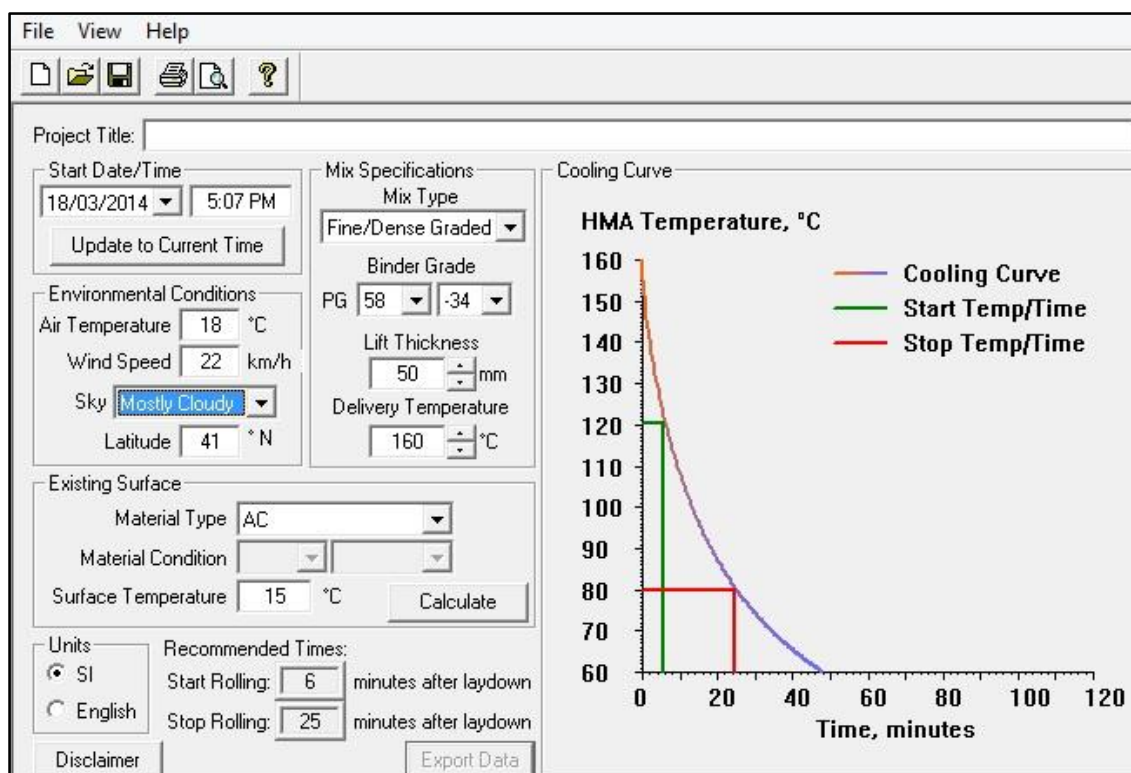


Figura 4.2 – Arrefecimento ao longo do tempo - (adaptado de PaveCool)

Para sobrepor os dois resultados foi adoptada uma simplificação, uma vez que a curva de arrefecimento fornecida pelo PaveCool não nos permite avaliar a evolução da temperatura no interior

da camada. Neste sentido foi feita a média das temperaturas obtidas com o modelo desenvolvido neste trabalho. O Quadro 4.2 define três casos utilizados para a validação do modelo desenvolvido. Nos três casos é considerado o mesmo material (*BB*) e a temperatura da camada de base (15 °C).

Quadro 4.2 – Casos considerados na validação

Casos	T _{ar} (° C)	Vento (m/s)	Nebulosidade	Espessura (cm)	T _{aplicação} (°C)
1	18	6	Céu coberto	5	160
2	15	2	Céu parcialmente coberto	8	160
3	10	15	Céu limpo	12	150

Note-se que para esta validação foi assumida a mesma expressão para o cálculo do coeficiente de convecção aplicado pelo PaveCool.

Nas figuras 4.3, 4.4 e 4.5 apresentam-se as comparações das médias das temperaturas obtidas pelo modelo de cálculo e o PaveCool para o caso 1,2 e 3 respectivamente.

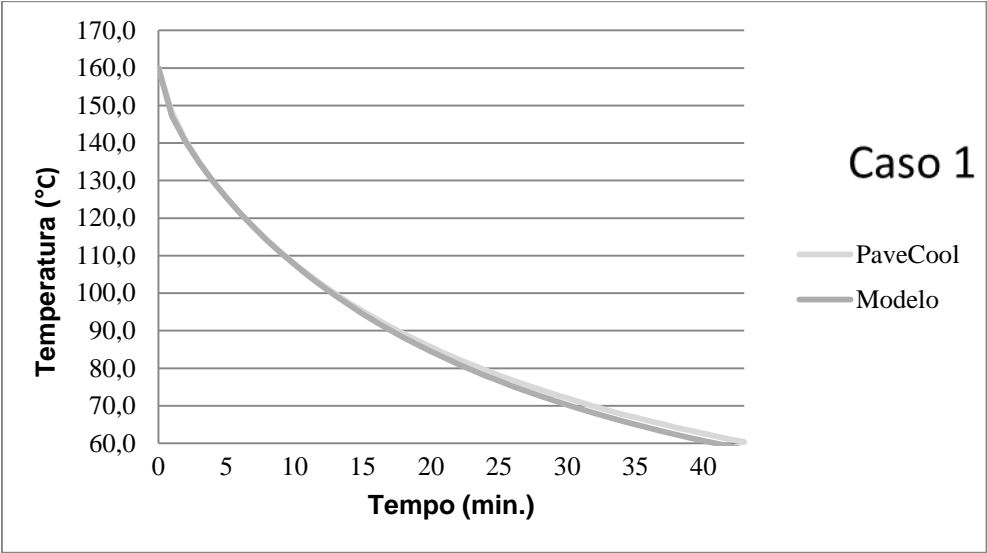


Figura 4.3 – Comparação de arrefecimento PaveCool/Modelo – Caso 1

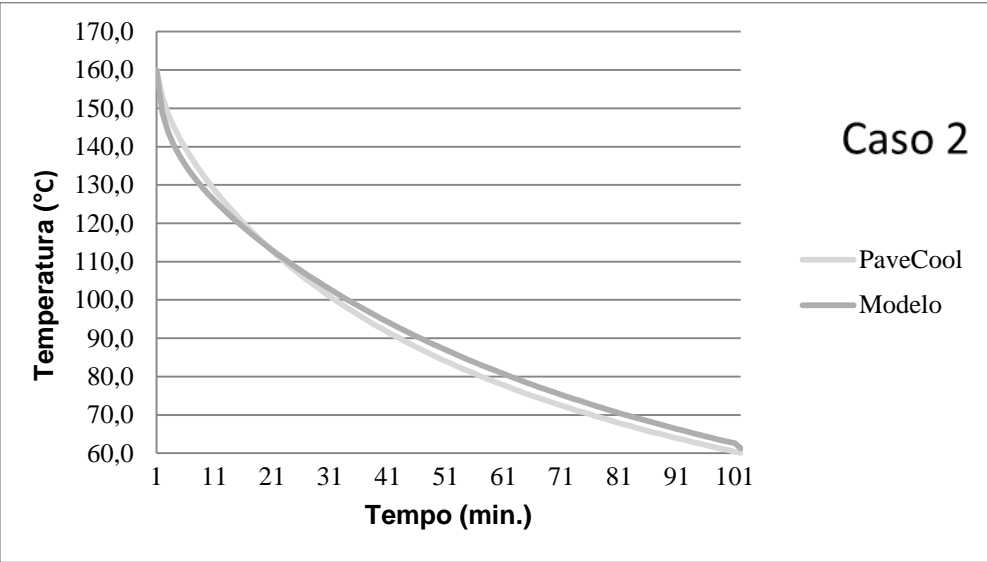


Figura 4.4 – Comparação de arrefecimento PaveCool/Modelo – Caso 2

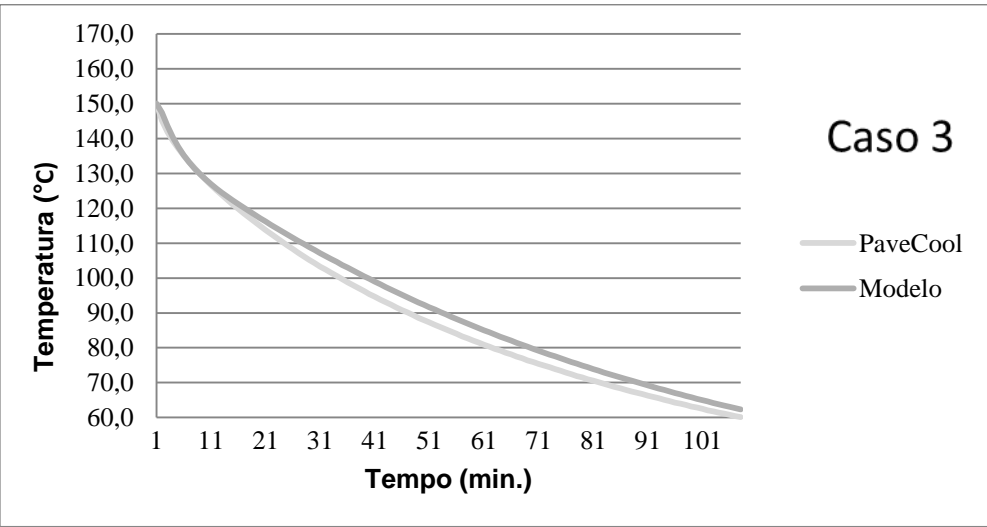


Figura 4.5 – Comparação de arrefecimento PaveCool/Modelo – Caso 3

Pela comparação entre a curva obtida pelo PaveCool e a curva do modelo desenvolvido, verifica-se que o arrefecimento previsto pelo modelo desenvolvido é mais rápido. O arrefecimento mais rápido traduz-se num período de tempo menor para ser executada a compactação. No entanto, é possível ver que essa diferença é mais significativa a partir dos 20 minutos e que apesar do ligeiro desvio o desenvolvimento do arrefecimento é bastante próximo nos dois casos.

No caso 2 é possível observar que a semelhança das curvas é também constante ao longo de todo o arrefecimento, embora neste caso o modelo desenvolvido neste trabalho apresente a chegada aos 60°C ligeiramente mais tarde que a curva determinada pelo PaveCool.

Para o terceiro caso, o modelo desenvolvido apresenta novamente um arrefecimento mais lento que o apresentado pelo PaveCool e é possível concluir-se que o aumento da espessura conduz ao aumento da diferença entre os modelos. Esta diferença poderá ser potenciada pela simplificação do modelo desenvolvido na obtenção da curva de arrefecimento, que foi feita com base na média das temperaturas obtidas ao longo da camada.

Com efeito, é possível considerar garantida a validação do modelo construído, uma vez que se verifica uma proximidade aceitável nos resultados em relação ao PaveCool.

4.4. Casos considerados

As situações reais consideradas nesta análise são quatro e variam em espessura quanto à camada aplicada de mistura betuminosa. A espessura da camada de base assume-se constante, 20cm. Tanto a camada de superfície como a camada de base variam quanto ao tipo de material aplicado, pelo que as quatro estruturas de pavimento são consideradas neste estudo são as seguintes:

- Estrutura 1: Camada superficial de mistura betuminosa (3cm) e camada de base betuminosa (20cm);
- Estrutura 2: Camada superficial de mistura betuminosa (5cm) e camada de base betuminosa (20cm)
- Estrutura 3: Camada superficial de mistura betuminosa (8cm) e camada de base *ABGE* (20cm)
- Estrutura 4: Camada superficial de mistura betuminosa (12cm) e camada de base *ABGE* (20cm)

4.4.1. Perfis de temperatura

Para a mesma parametrização considerada no caso 1 considerada na secção 4.3, pode-se fazer uma avaliação dos perfis de temperatura em profundidade, nas camadas do pavimento. Esta análise permite ter uma percepção gráfica da temperatura em cada ponto da camada ao fim de um determinado tempo de arrefecimento, tendo sido considerados os seguintes instantes: 0min.

(momento da pavimentação), 10min., 30min., 1h, 2h e 10h. As características térmicas consideradas em cada uma das quatro estruturas analisadas são as que constam do Quadro 4.1.

Nas Figuras 4.6 e 4.7, é possível ver os perfis da temperatura das Estruturas 1 e 2, as quais são constituídas por *BB* na de base, nas Figuras 4.8 e 4.9 apresentam-se os perfis de temperatura das Estruturas 3 e 4, com base em *ABGE*.

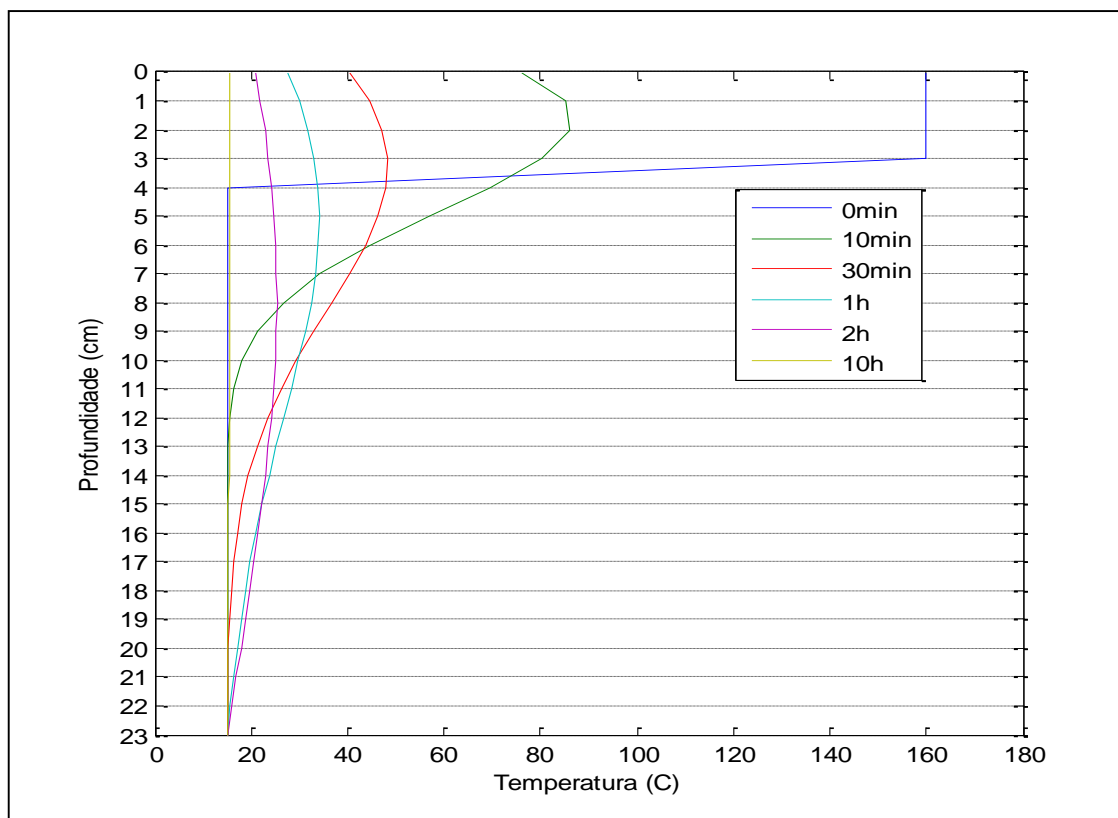


Figura 4.6 – Perfil de temperatura da Estrutura 1
(3cm de SMA-C e base 20cm de BB-3D)

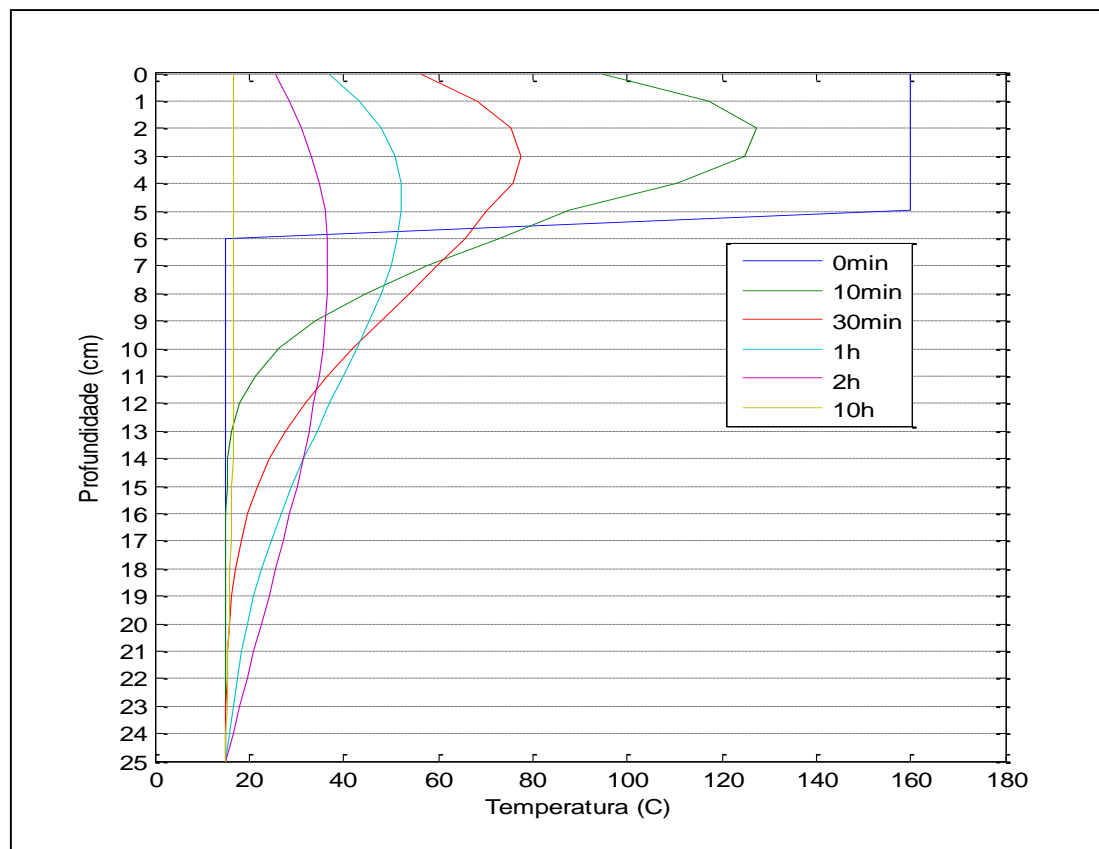


Figura 4.7 - Perfil de temperatura da Estrutura 2
(5cm de BB-4C e base 20cm de BB-3D)

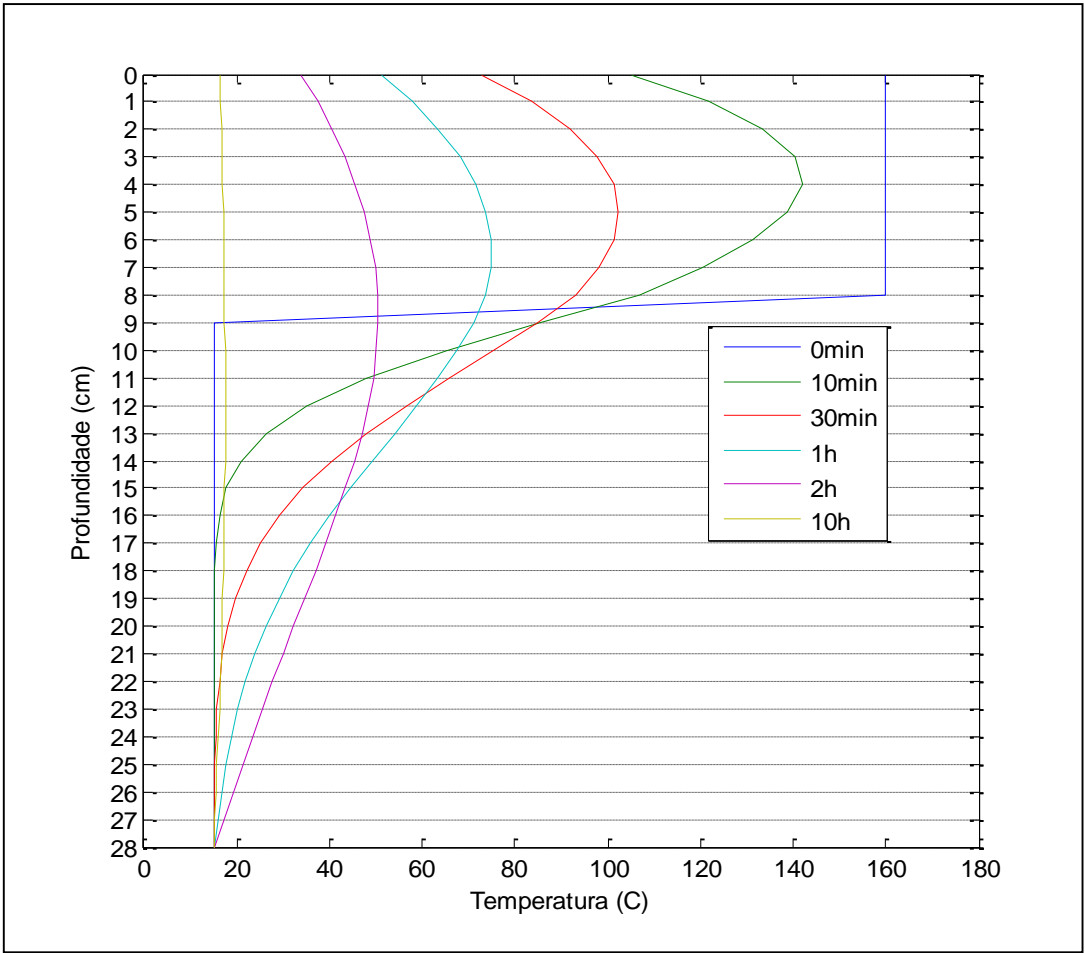


Figura 4.8 - Perfil de temperatura da Estrutura 3
(8cm de BB-4C e base 20cm de ABGE)

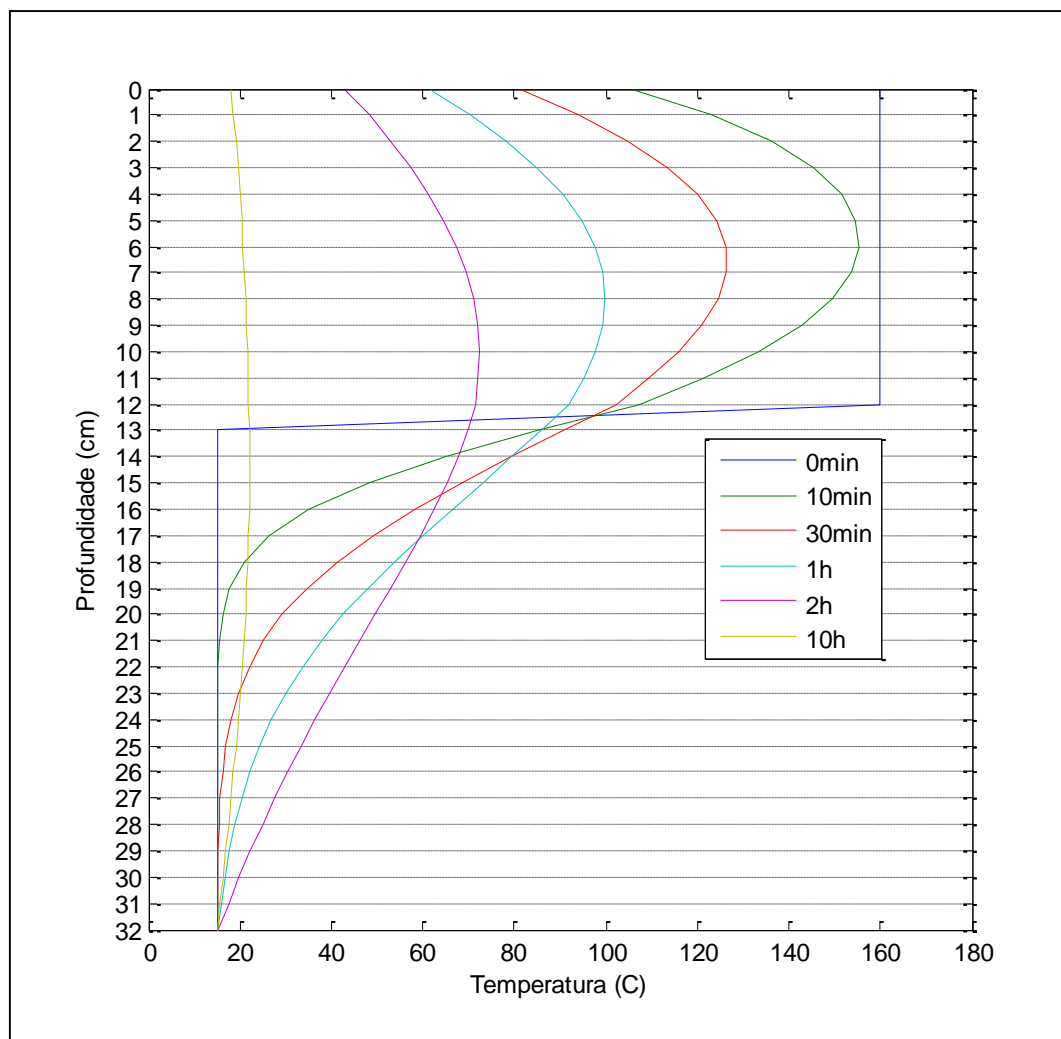


Figura 4.9 - Perfil de temperatura da Estrutura 4
(12cm de BB-4C e base 20cm de ABGE)

Numa análise preliminar dos perfis é notória a influência da espessura no que diz respeito ao arrefecimento ao longo do tempo. Assim, prevê-se que as camadas de espessura mais fina tenham uma dificuldade muito maior em manter uma temperatura aceitável para a compactação.

4.4.2. Arrefecimento ao longo do tempo

Do mesmo modo que no subcapítulo anterior, mantendo a mesma parametrização que a considerada em 4.3, é possível fazer uma análise no sentido de prever o tempo disponível para a compactação. Este tipo de análise gráfica permite ver a evolução da temperatura ao longo do tempo em cada ponto da camada de mistura betuminosa aplicada. Desta forma, tendo em conta que a compactação se deve iniciar antes de a mistura baixar dos 100 °C, a Figura 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13 dão conta do arrefecimento ao longo do tempo nas Estruturas 1, 2, 3 e 4 respectivamente.

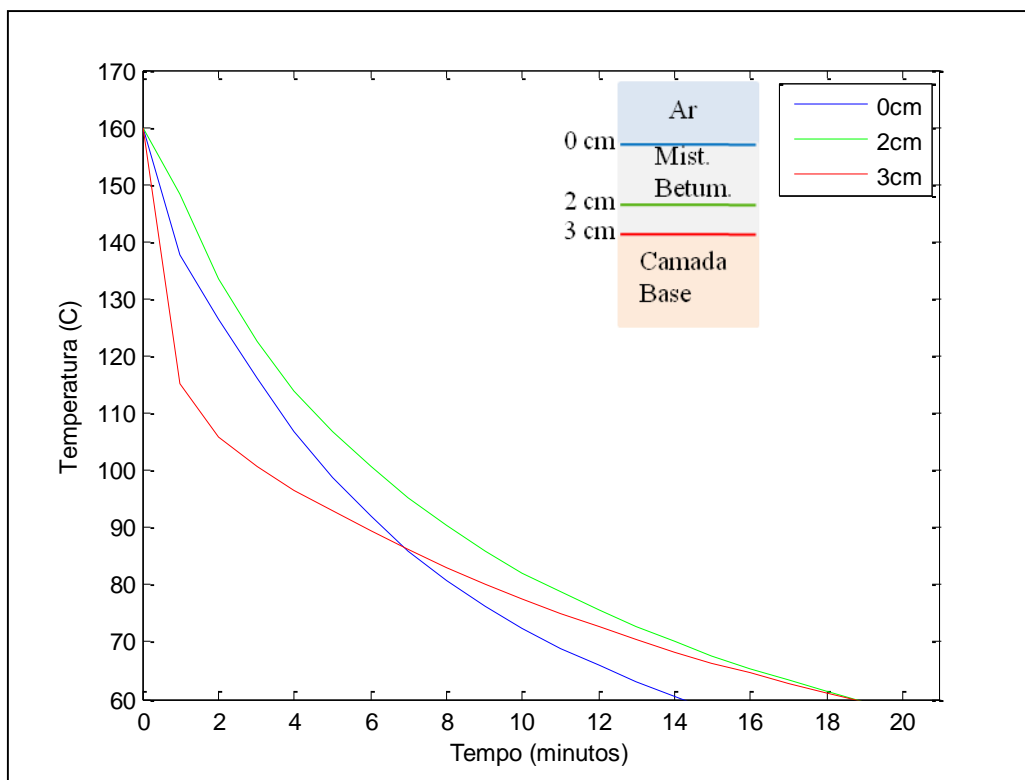


Figura 4.10 – Arrefecimento ao longo do tempo da Estrutura 1

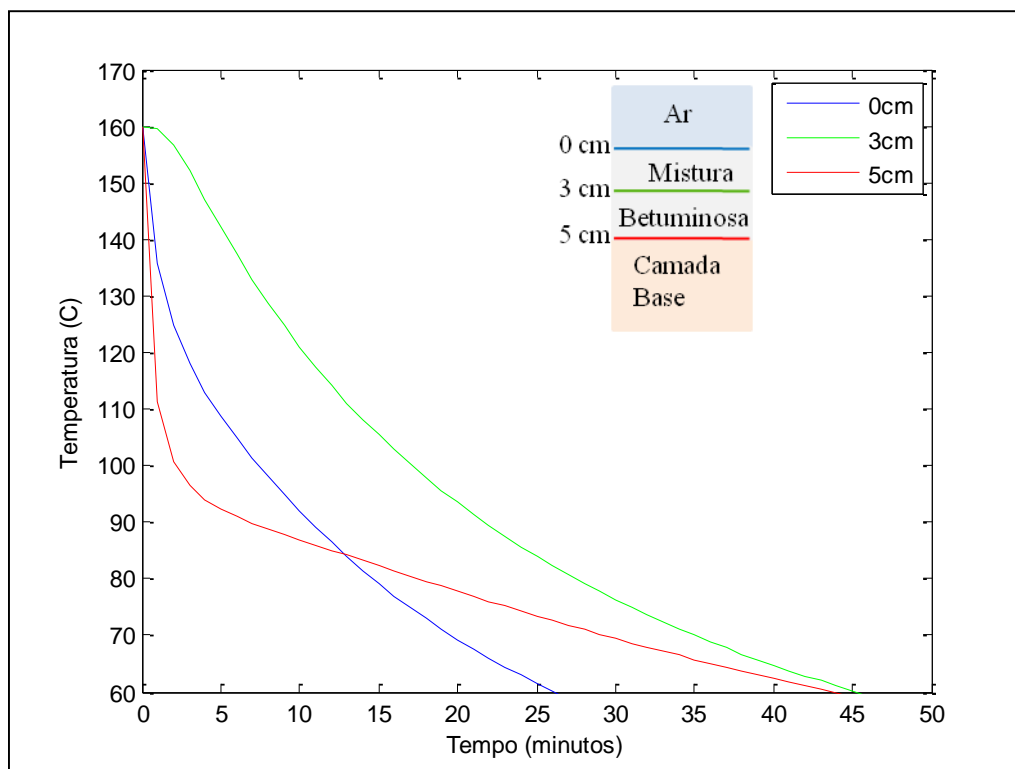


Figura 4.11 – Arrefecimento ao longo do tempo na Estrutura 2

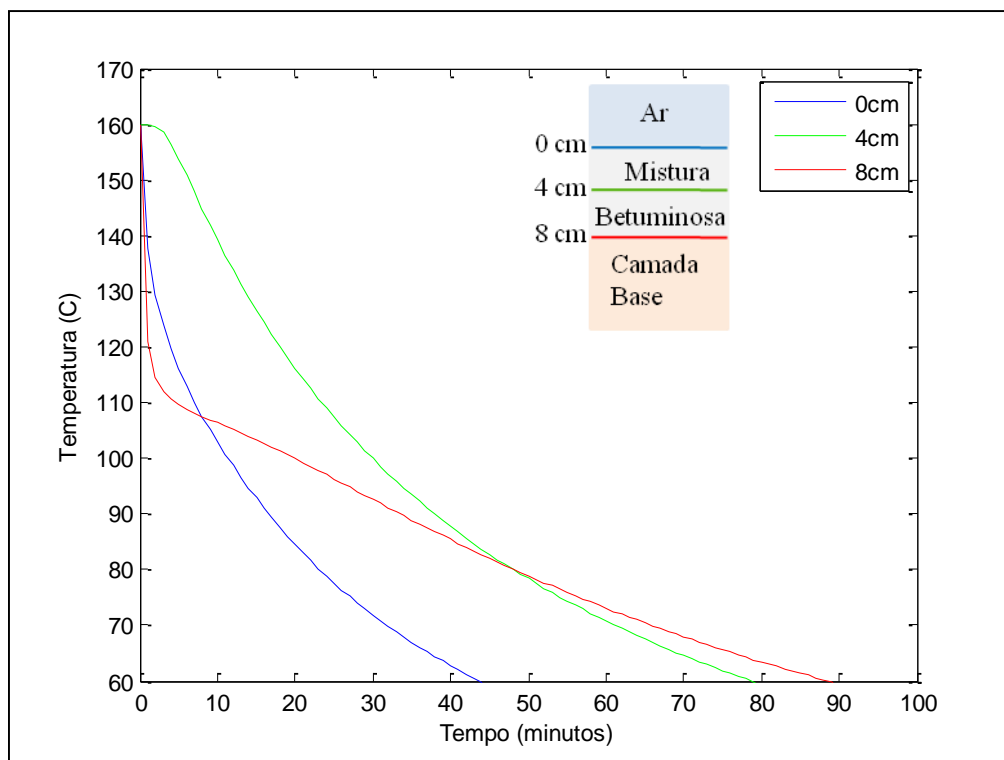


Figura 4.12 - Arrefecimento ao longo do tempo na Estrutura 3

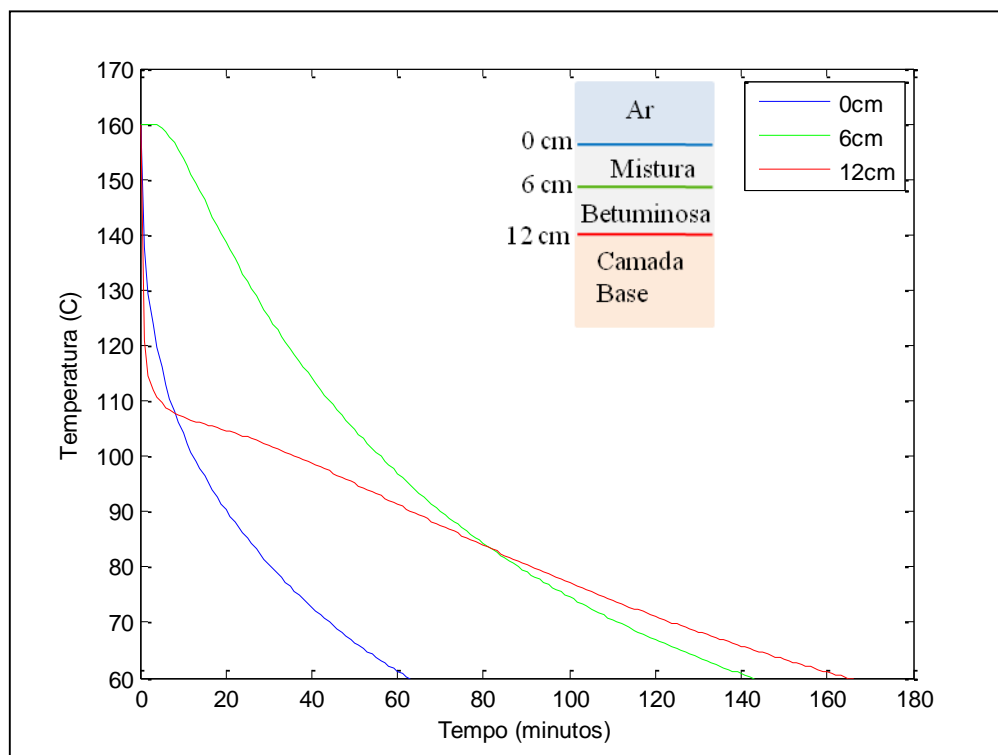


Figura 4.13 - Arrefecimento ao longo do tempo na Estrutura 4

Por observação dos gráficos é possível constatar o mesmo que na observação dos perfis, ou seja, que a espessura da camada tem uma influência bastante considerável no que ao arrefecimento diz respeito. Para além disso, fica claro o padrão de arrefecimento nas várias camadas, sendo que as camadas interiores apresentam um arrefecimento bastante mais regular durante todo o tempo. Em

comparação com as camadas limites é possível ver que existe uma perda de temperatura bastante acentuada na primeira fase do arrefecimento, acabando a temperatura da interface entre os dois materiais, por se aproximar rapidamente das temperaturas do interior da camada. Este facto poderá indicar que as superfícies do material acabam por ser os pontos mais influentes no arrefecimento para a parametrização considerada. Também nos pontos limite da camada da mistura, principalmente nas estruturas 1 e 2 em que a espessuras de aplicação são mais pequenas, apresentam uma fraca compactibilidade, uma vez que baixam muito rapidamente dos 100°C.

4.5. Condições de análise paramétrica

Como já foi visto antes, para o estudo do arrefecimento da camada betuminosa, é necessário ter em conta um grande número de parâmetros. Foram definidos e considerados valores significativos, para minimizar o número de situações a estudar, obtendo uma parametrização equilibrada para ser possível determinar a influência de cada parâmetro no arrefecimento.

Desta forma, os parâmetros que a ter em conta são os seguintes para as quatro estruturas definidas anteriormente:

- Espessura da camada de mistura betuminosa aplicada (3, 5, 8 e 12cm);
- Espessura da camada de base fixa em 20cm;
- Temperatura da camada de base fixa em 15°C;
- Temperatura do ar (0, 10 e 30°C)
- Temperatura de aplicação da mistura betuminosa (160 e 150°C);
- Velocidade do vento:
 - Vento fraco (2m/s);
 - Vento moderado (7m/s);
 - Vento forte (15m/s);
- Nebulosidade:
 - Céu limpo (0%);
 - Céu parcialmente coberto (50%);
 - Céu coberto (100%).

No que diz respeito às características térmicas e geométricas da estrutura do pavimento consideradas, a representação encontra-se no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Características geométricas e térmicas da estrutura

Material	Espessura (cm)	λ (W/m.°C)	c (J/Kg.°C)	ρ (Kg/m ³)
Mistura betuminosa A	3 a 5	1,2	921	2400
Mistura betuminosa B	8 a 12	2,0	869	2350
Camada de base	20	1,3 a 2,0	837 a 869	1750 a 2350

4.6. Variação das condições atmosféricas

4.6.1. Variação da temperatura do ar

Para a variação da temperatura do ar consideram-se três casos: 0°C, 10°C e 30°C. A avaliação é feita para a geometria das quatro estruturas consideradas em 4.4 e os restantes parâmetros são mantidos fixos em todos os casos para que seja possível ter a percepção da influência da temperatura do ar no arrefecimento em cada situação. A temperatura de aplicação da mistura betuminosa é 160°C, a velocidade do vento é moderada (7m/s), céu limpo e as características térmicas dos materiais são $\lambda = 2,0$ W/(m. °C), $c = 869$ J/(Kg. °C) e $\rho = 2350$ Kg/m³. As características térmicas são nesta fase consideradas iguais para todas as camadas para simplificar a avaliação. A temperatura da base será considerada 15°C.

As Figura 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17 apresentam o arrefecimento para as três temperaturas do ar consideradas nas estruturas 1, 2, 3 e 4 respectivamente.

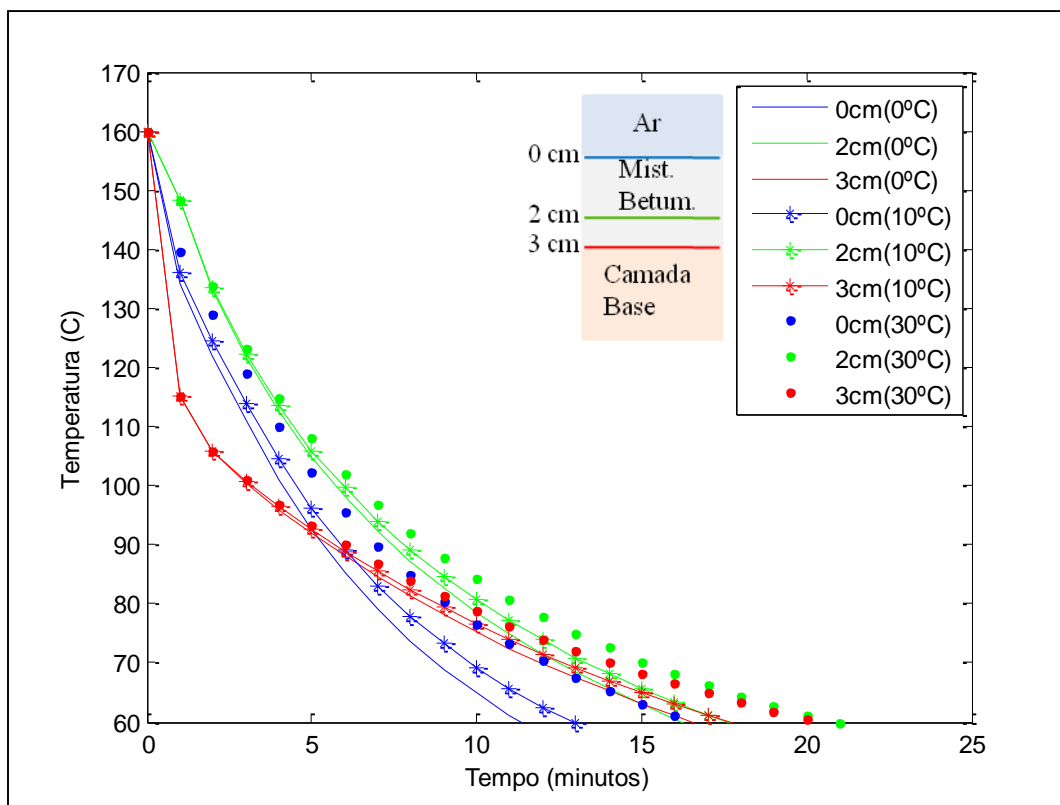


Figura 4.14 – Arrefecimento ao longo do tempo para variação da T_{ar} – Estrutura 1

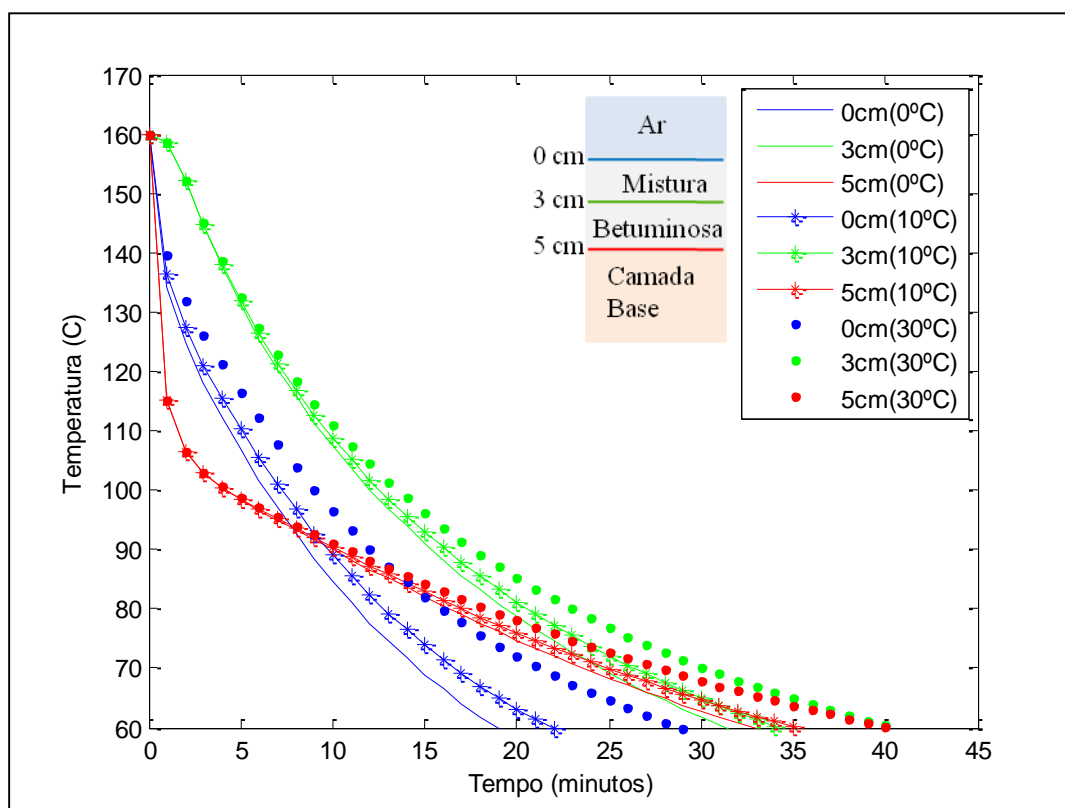


Figura 4.15 - Arrefecimento ao longo do tempo para variação da T_{ar} – Estrutura 2

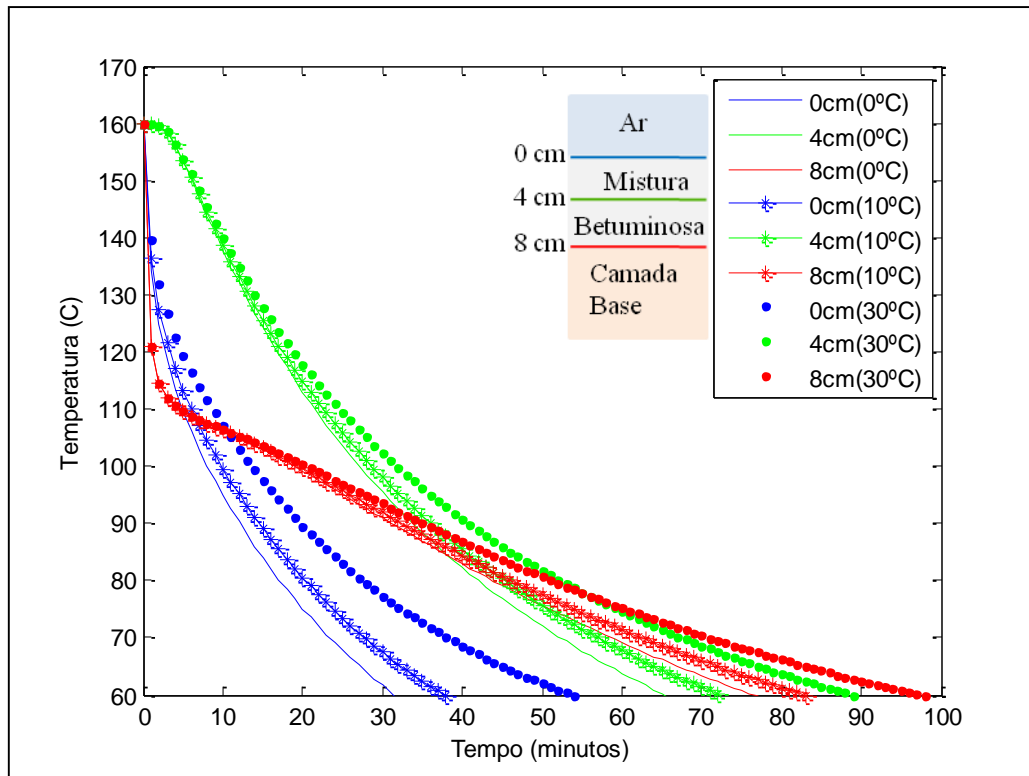


Figura 4.16 - Arrefecimento ao longo do tempo para variação da T_{ar} – Estrutura 3

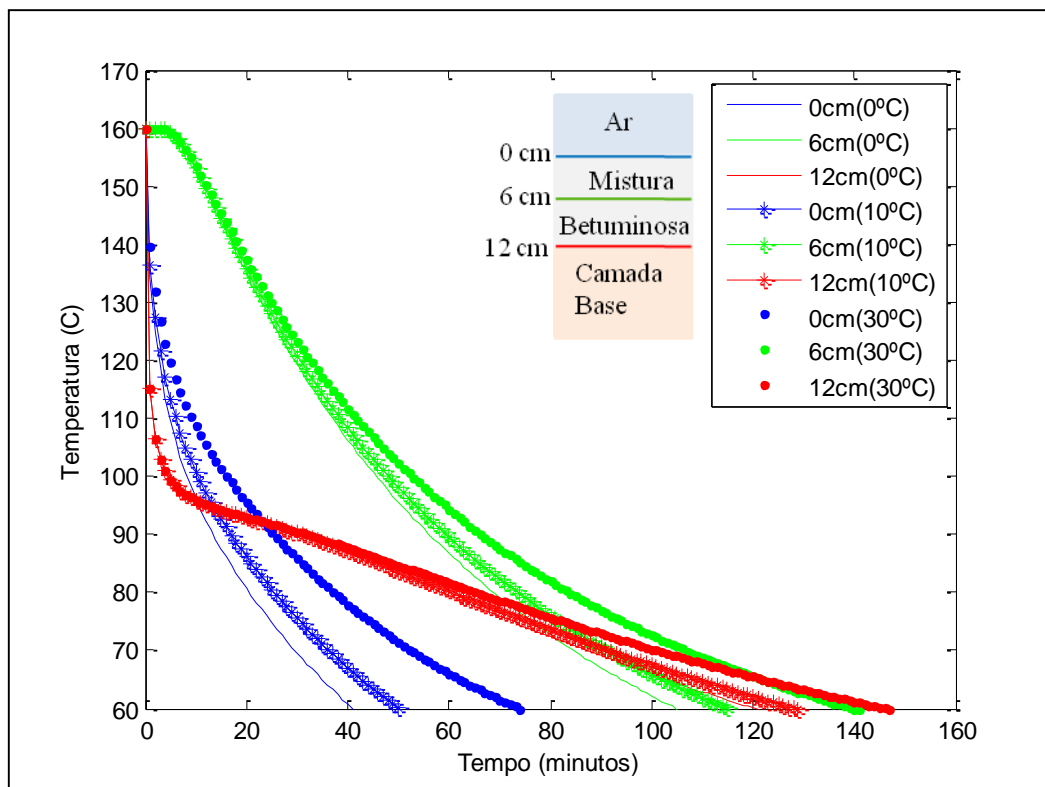


Figura 4.17 - Arrefecimento ao longo do tempo para variação da T_{ar} – Estrutura 4

Como esperado pelos resultados anteriores, o factor que mais influencia o tempo de arrefecimento é a espessura da camada de betuminoso aplicada pois o tempo de arrefecimento aumenta consideravelmente quanto maior for a espessura. Contudo, existem mais considerações

importantes a reter, nomeadamente, no que diz respeito à influência que a temperatura do ar tem na superfície da camada, que a leva a ser consecutivamente o ponto com arrefecimento mais rápido em relação aos pontos interiores, independente da geometria da estrutura do pavimento.

Analisando todos os gráficos é possível perceber também que à medida que a espessura aumenta o tempo de arrefecimento aumenta, a diferença de arrefecimento provocada na superfície da camada pela alteração da temperatura do ar é também o mais significativo.

Para a camada limite de contacto com o pavimento, verifica-se em todas as situações arrefecimento muito acentuado no início, acabando por se aproximar das curvas de temperatura dos pontos do meio da camada; acaba mesmo por apresentar um arrefecimento mais lento que os pontos do meio da camada para as estruturas de maior espessura, estrutura 3 e 4. De qualquer forma, esta situação traduz que aquela zona da camada betuminosa dificilmente terá condições de ser compactada com sucesso.

O Quadro 4.4 apresenta o tempo disponível para a compactação, para o ponto mais interior da camada, a partir da leitura expedita dos gráficos representados nas Figuras 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17, e considerando como limite 100°C. Fez-se também a determinação para quando se atinge 60°C, para que se tenha uma percepção do tempo necessário de abertura ao tráfego para cada uma das estruturas. A opção pela camada mais interior deve-se a que é este o ponto que traduz a compactabilidade da mistura, uma vez que muito dificilmente os pontos limites da camada têm condições boas de compactação.

Quadro 4.4 – Tempo disponível para a compactação e abertura ao tráfego variação de T_{ar}
(Tempo dado em forma decimal)

Estrutura	Tempo aos 100 °C (min.)			Tempo aos 60°C (min.)		
	0°C	10°C	30°C	0°C	10°C	30°C
1	5,9	6,0	6,1	16,1	17,5	20,0
2	13,0	14,0	15,0	32,0	34,0	40,0
3	28,0	30,0	32,0	65,0	81,0	89,0
4	49,0	50,0	57,0	105,0	115,0	145,0

Em seguida fez-se variar a temperatura da camada de base, com o objectivo de perceber de que forma esta temperatura afecta o arrefecimento da camada. Estes valores foram obtidos com base numa aproximação dos valores disponibilizados por diferentes autores em (Branco *et al*, 2011) por exemplo estão disponibilizadas duas formas de chegar a estes valores, a primeira de acordo com a expressão 4.1.

$$T_{mb} = (T_{mma} + 17,778) \cdot \left(1 + \frac{1}{39,37.z+4}\right) - \frac{18,889}{39,37.z+4} - 14,444 \quad (4.1)$$

Em que, T_{mb} é a temperatura média mensal ($^{\circ}\text{C}$), de cada um dos meses do ano, no betão betuminoso, à profundidade z (m), medida a partir da superfície do pavimento. T_{mma} é temperatura média mensal do ar ($^{\circ}\text{C}$).

Com as mesmas variáveis o mesmo autor disponibiliza uma outra forma de cálculo que pode servir para aproximar a temperatura da camada de base acordo com a equação 4.2.

$$T_{mb} = (16,23 \cdot z - 0,944) + (0,656 - 0,327 \cdot z) \cdot (T_{mma} \cdot 1,8 + 32) - 17,778 \quad (4.2)$$

Ainda neste âmbito pode ser considerada uma outra expressão disponibilizada em (Ongel & Harvey, 2004) que pode ser definida por *BELLS2* de acordo com a equação 4.3.

$$T = 2,9 + 0,935 \cdot IR + \left(\frac{\log(d)}{17,8} \right) \cdot \left\{ -0,487 \cdot IR + 0,626 \cdot (1 - day) + 3,29 \cdot \sin \left[(hr_{11} - 15,5) \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{18} \right] \right\} + 0,037 \cdot IR \cdot \sin \left[(hr_9 - 13,5) \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{18} \right] \quad (4.3)$$

Onde, T é a temperatura do pavimento ($^{\circ}\text{C}$) à profundidade d (mm), IR a temperatura da superfície do infravermelho ($^{\circ}\text{C}$) e $1-day$ é a temperatura média do ar no dia antes do teste ($^{\circ}\text{C}$); hr é a hora do dia em sistema de 24 horas, calculado para uma mistura betuminosa de 18 horas em ciclo de aumento e perda; hr_{11} é o tempo decimal entre 11:00 e 5:00 horas e se o tempo real for fora deste intervalo de tempo então, $hr_{11}=11$. Se o tempo real for inferior a 5:00 adicionar 24, por exemplo, se o tempo for 13:15 então o tempo decimal é 13,25. hr_9 é o tempo decimal entre 09:00 e 03:00 horas e se o tempo real for fora deste intervalo então $hr_9=9$, e se o tempo real for inferior a 03:00 adicionar 24.

Tendo em conta uma aproximação baseada nos resultados das três expressões anteriores foi tomada a opção de considerar a mesma parametrização, variando a temperatura do ar de acordo com os mesmos valores, 0, 10 e 30°C , com a variação correspondente de temperatura de base 3, 14 e 37°C respectivamente.

A Figura 4.18 apresenta o arrefecimento para as três temperaturas do ar consideradas na estrutura 1, assim como para as respectivas temperaturas da camada de base associadas mantendo todos os outros parâmetros iguais à primeira avaliação.

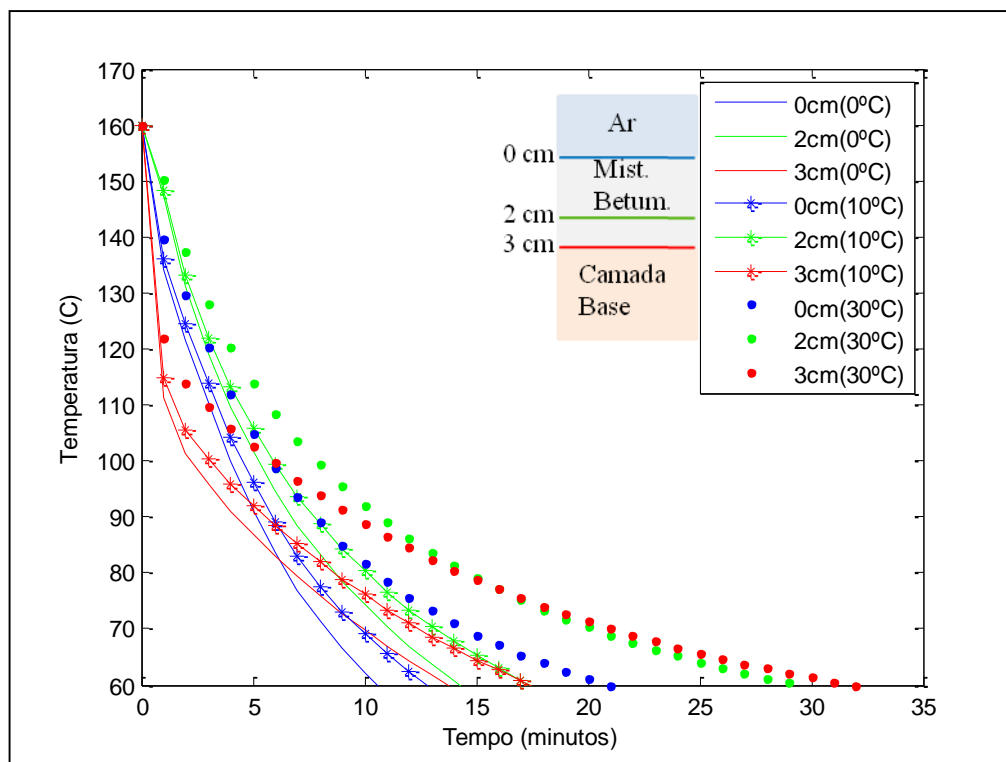


Figura 4.18 - Arrefecimento ao longo do tempo para variação da T_{ar} e T_{base} — Estrutura 1

Nota-se uma alteração significativa, principalmente no caso em que a temperatura do ar é de 0°C, o que seria de esperar tendo em conta a grande diferença de temperatura da base. No entanto, para a temperatura do ar de 10°C a variação é reduzida relativamente ao caso em que se considera fixa a temperatura de base, o que tem a ver com a proximidade das temperaturas de base consideradas nos dois casos serem muito próximas. A maior diferença é notada, no que diz respeito ao caso em que a temperatura de base é 37°C superior à temperatura do ar 30°C. Nesta situação é possível observar uma grande diferença na chegada aos 60°C, por exemplo. Contudo, se for centrada a análise apenas na chegada aos 100°C, reparamos que se mantêm as dificuldades de compactação nos pontos limites da camada, facto que é atribuído à espessura total da camada.

Para as mesmas condições é agora efectuada a mesma avaliação para as restantes estruturas, apresentadas nas Figuras 4.19, 4.20 e 4.21.

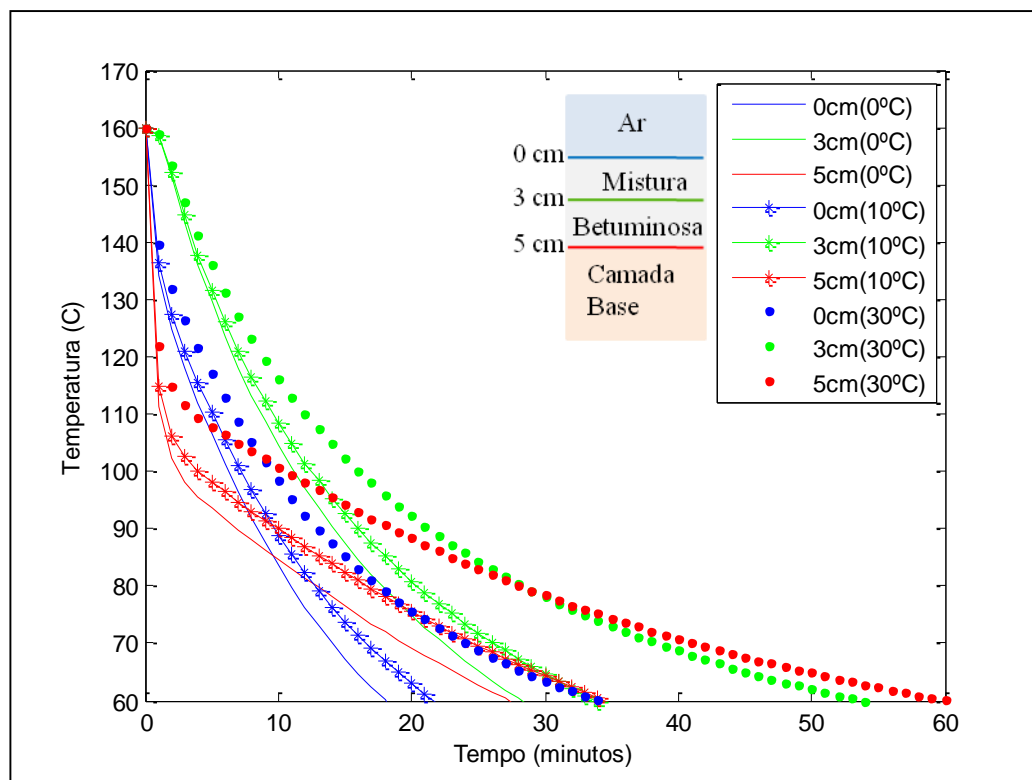


Figura 4.19 - Arrefecimento ao longo do tempo para variação da T_{ar} e T_{base} — Estrutura 2

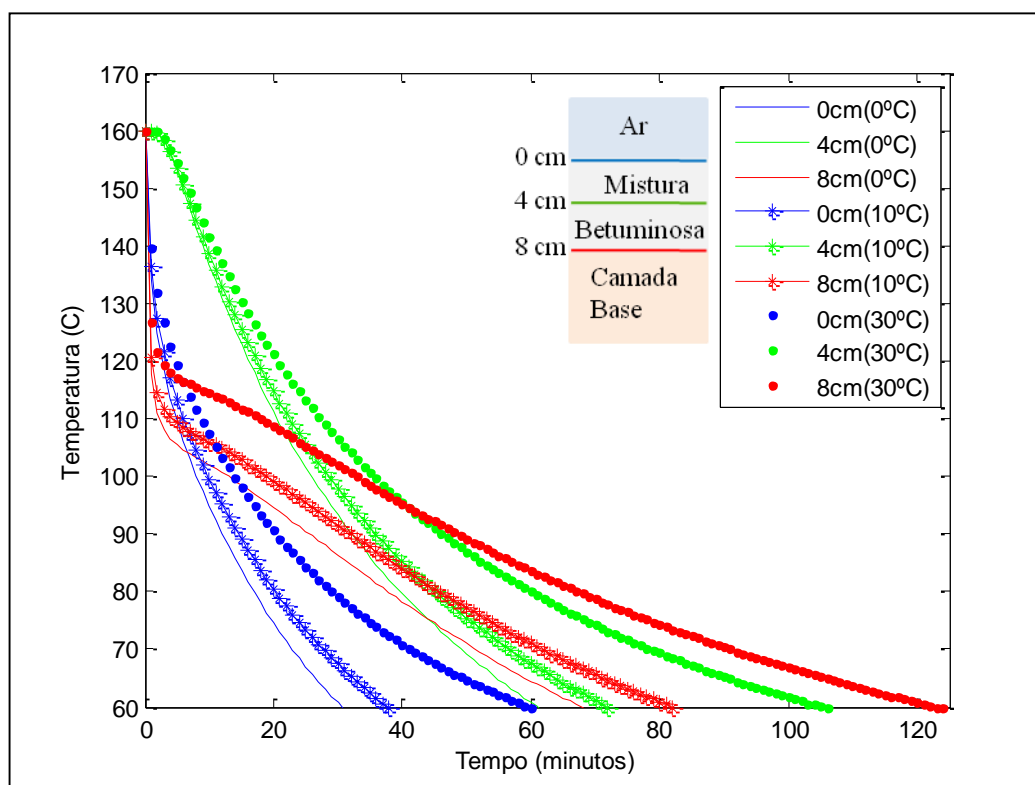


Figura 4.20 - Arrefecimento ao longo do tempo para variação da T_{ar} e T_{base} — Estrutura 3

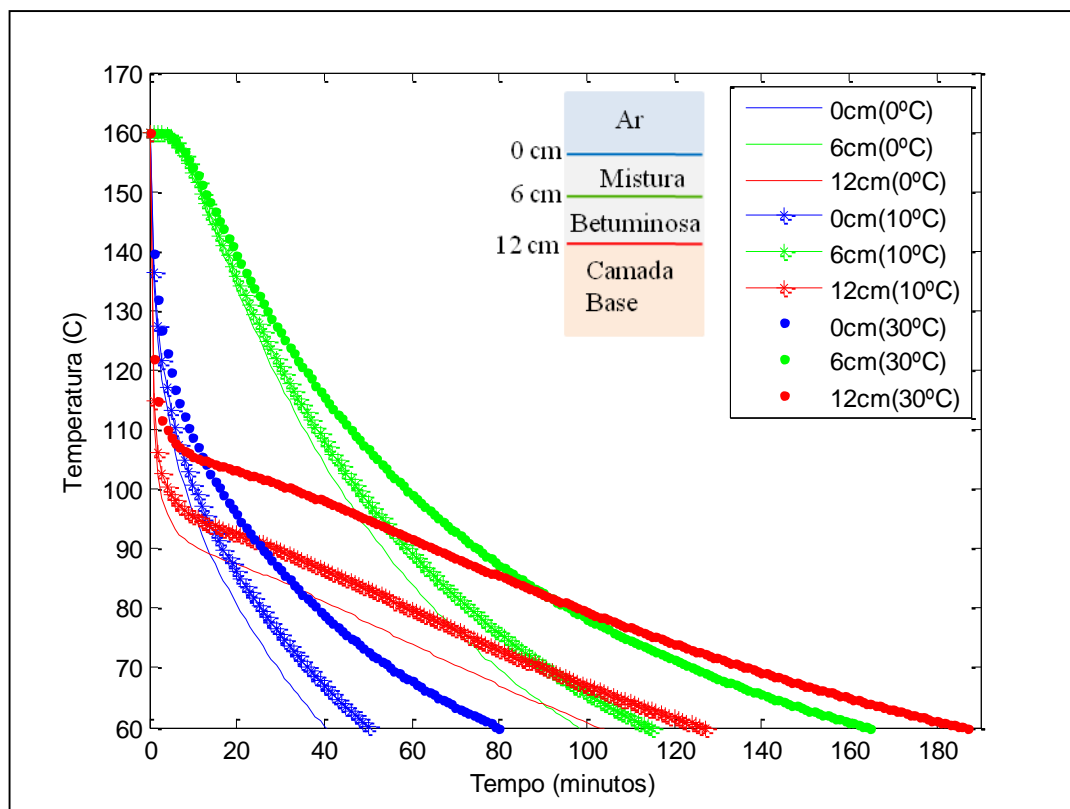


Figura 4.21 - Arrefecimento ao longo do tempo para variação da T_{ar} e T_{base} — Estrutura 4

Executando o modelo de acordo com os parâmetros definidos, agora com variação da temperatura da camada de base, é possível concluir que como esperado a temperatura da base tem influência significativa no arrefecimento da camada de mistura betuminosa aplicada. Pela comparação gráfica, observa-se um aumento considerável da amplitude para as diferentes temperaturas do ar. O principal ponto a ressaltar nesta avaliação é inequivocamente a dificuldade em ter boas condições de compactação da mistura na zona de contacto entre as camadas. No entanto, em todos os casos em que a temperatura do ar é de 30°C esta situação perde importância. Conclui-se que a temperatura da camada de suporte é muito importante para o cálculo.

4.6.2. Variação da velocidade do vento

Na variação da velocidade do vento foi adoptado o mesmo método usado acima, fixando as restantes variáveis para ser possível tirar conclusões no que diz respeito apenas à influência da velocidade do vento nas estruturas, fazendo variar apenas a velocidade do vento. Para vento fraco, moderado e forte com velocidades de 2, 7 e 15m/s, respectivamente. Desta forma, consideram-se fixos os seguintes parâmetros:

- Temperatura de aplicação, 160°C;
- Temperatura da camada de base, 15°C;
- Temperatura do ar, 10°C;
- Céu limpo;

- $\lambda = 2,0 \text{ W/(m. } ^\circ\text{C)};$
- $c = 869 \text{ J/(Kg. } ^\circ\text{C)};$
- $\rho = 2350 \text{ Kg/m}^3.$

São obtidos, para as quatro estruturas consideradas, os gráficos apresentados nas Figuras 4.22, 4.23, 4.24 e 4.25.

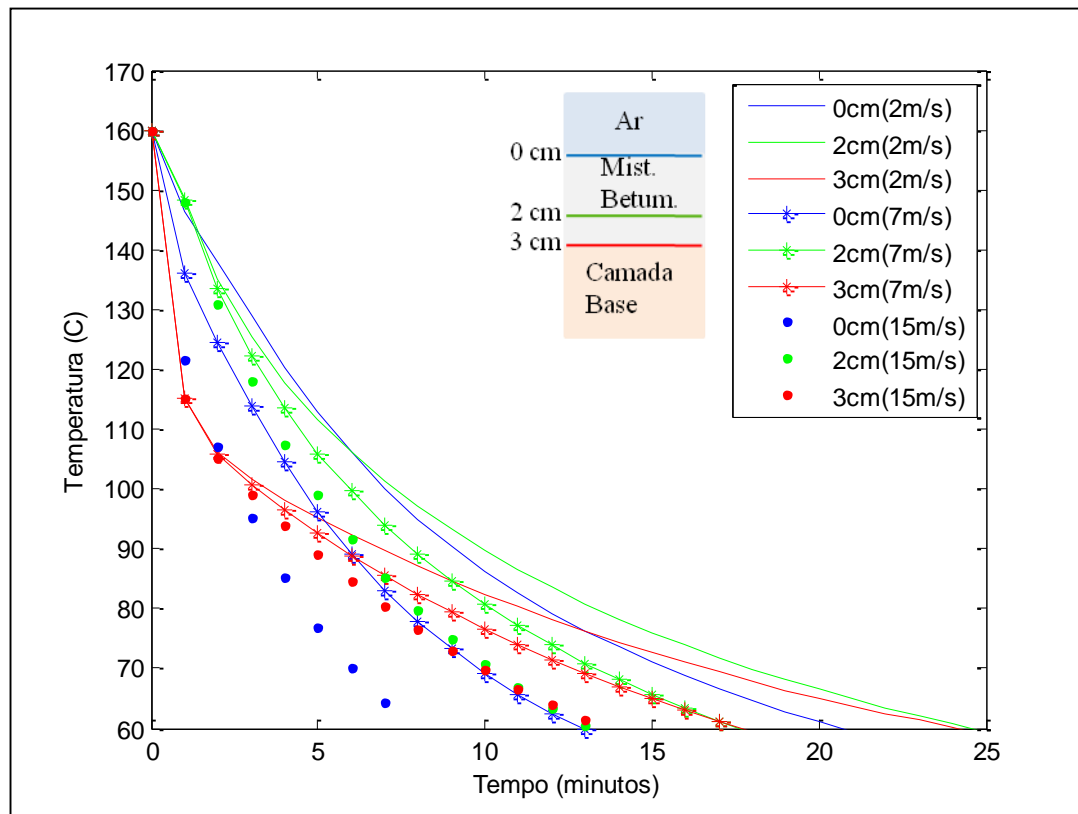


Figura 4.22 – Arrefecimento ao longo do tempo com variação da velocidade do vento – Estrutura 1

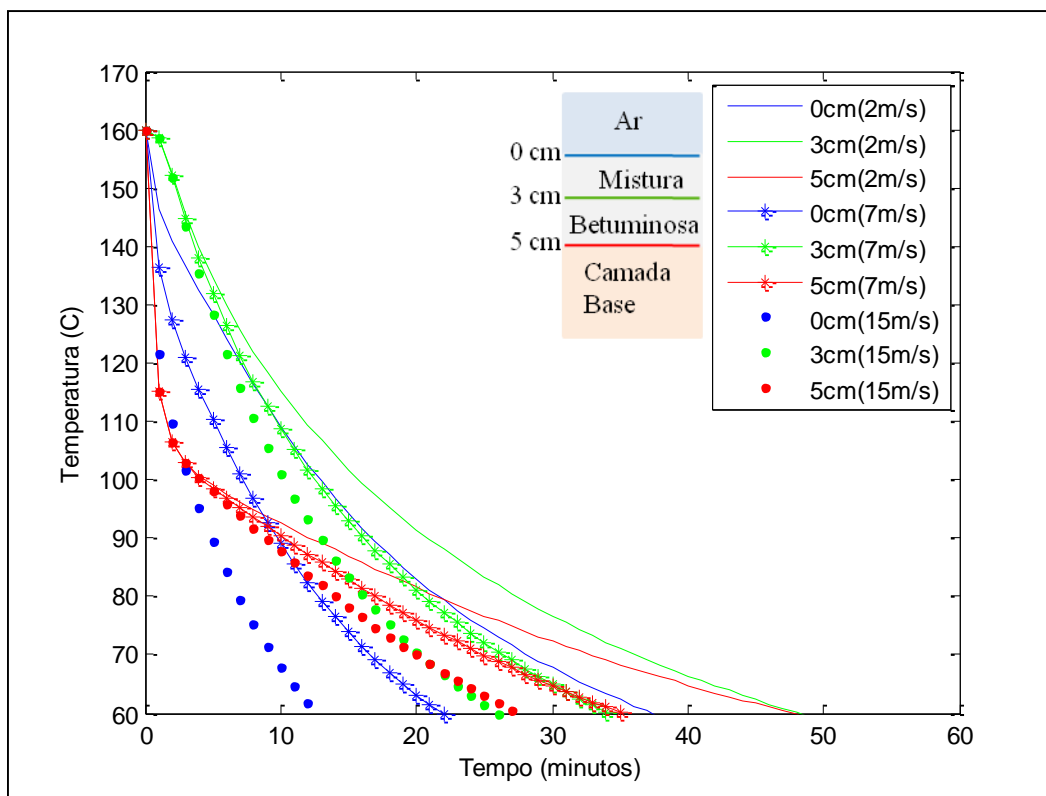


Figura 4.23 - Arrefecimento ao longo do tempo com variação da velocidade do vento – Estrutura 2

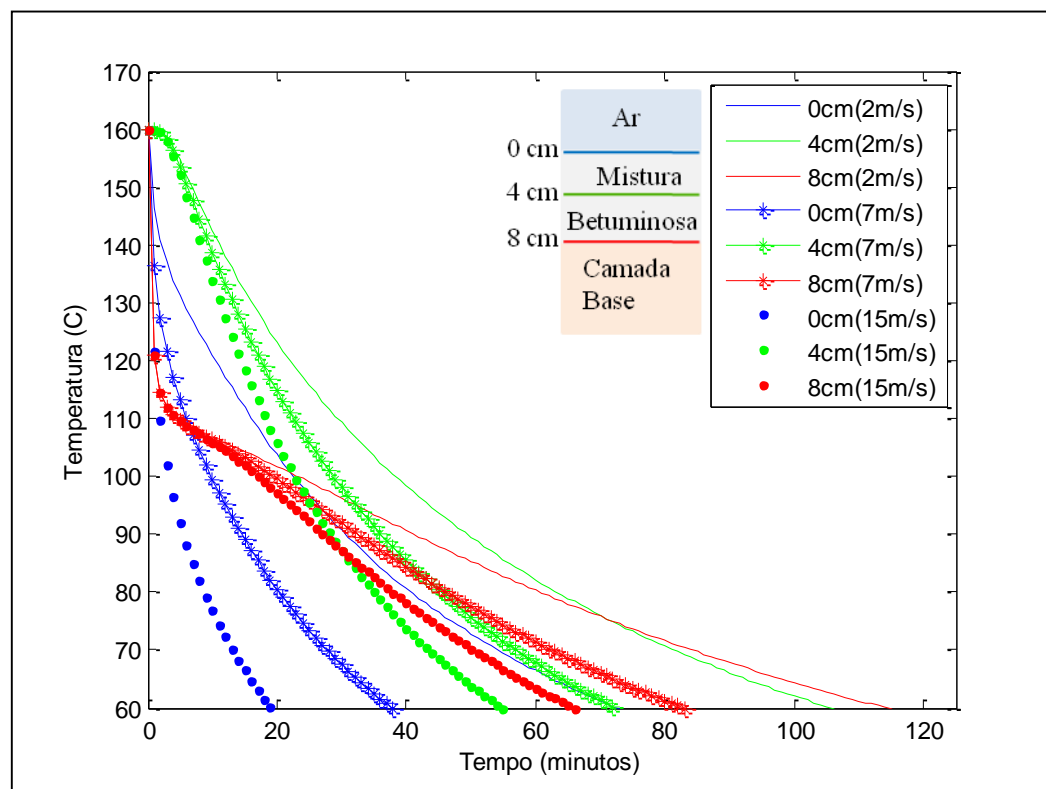


Figura 4.24 - Arrefecimento ao longo do tempo com variação da velocidade do vento – Estrutura 3

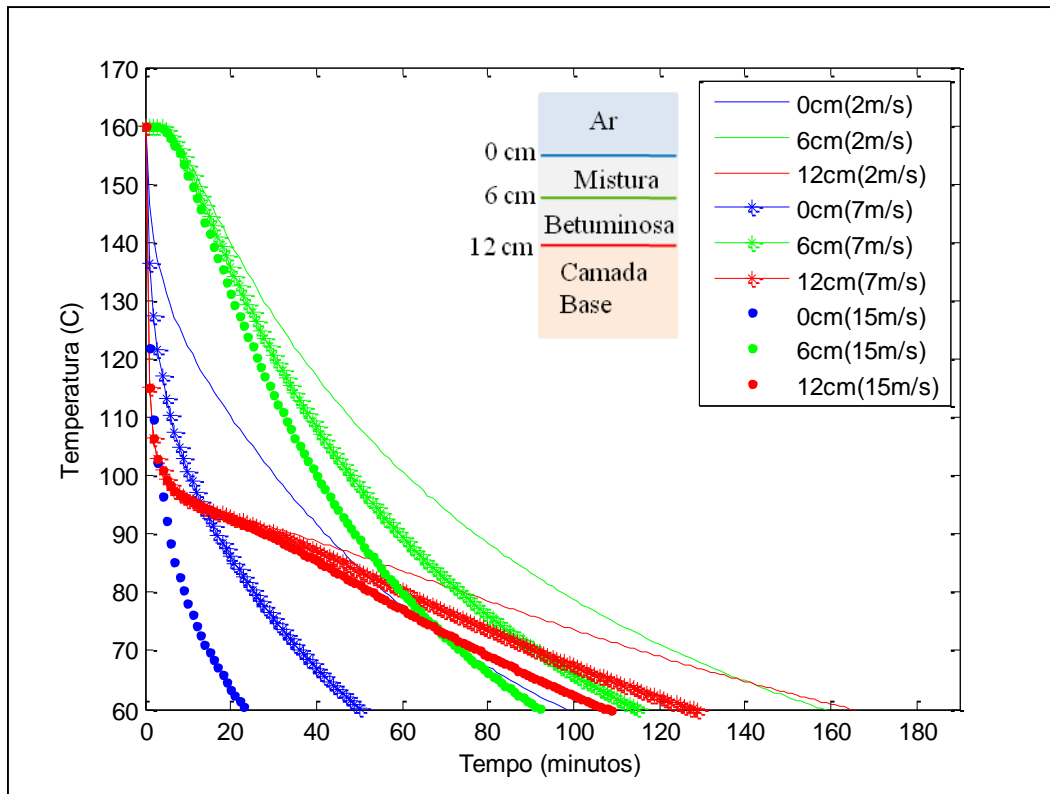


Figura 4.25 - Arrefecimento ao longo do tempo com variação da velocidade do vento – Estrutura 4

De acordo com os gráficos de arrefecimento obtidos, pode-se verificar que a variação do vento afecta de uma forma considerável a evolução das temperaturas ao longo do tempo em toda a camada betuminosa. É possível afirmar, comparando os gráficos de arrefecimento com variação da temperatura do ar, que a velocidade do vento tem uma influência maior. Invariavelmente a maior influência no arrefecimento deve-se à espessura de mistura betuminosa aplicada.

De igual forma, ao que acontece na avaliação da temperatura do ar, a camada de interface entre as duas camadas revela que é muito difícil a compactação adequada naquela zona, agravando o facto de nesta situação a compactabilidade ser também posta em causa na superfície para ventos moderados e fortes.

As grandes amplitudes das curvas de arrefecimento para as diferentes velocidades do vento, que se confirma pela observação dos gráficos obtidos, são a indicação da grande influência que a velocidade do vento tem sobre o arrefecimento. Confirmado pelos valores obtidos pelas leituras efectuadas graficamente para o ponto mais interior das estruturas consideradas na chegada aos 100°C e aos 60°C, no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 - Tempo disponível para a compactação e abertura ao tráfego variação de T_{ar}
(Tempo dado em forma decimal)

Estrutura	Tempo aos 100 °C (min.)			Tempo aos 60°C (min.)		
	15m/s	7m/s	2m/s	15m/s	7m/s	2m/s
1	5,0	7,0	8,0	13,0	17,5	24,0
2	14,0	16,0	20,0	31,0	39,0	52,0
3	25,0	32,0	41,0	55,0	72,0	105,0
4	50,0	60,0	70,0	105,0	129,0	185,0

Como é possível observar, pela comparação do Quadro 4.4 com o Quadro 4.5, a diferença de entre as temperaturas obtidas no segundo, para os efeitos do vento, provocam diferenças muito maiores que as variações provocadas pela variação da temperatura do ar no Quadro 4.4. Tendo em conta estes resultados, considera-se a velocidade do vento um parâmetro de maior influência que a temperatura do ar.

4.6.3. Variação da nebulosidade

Na variação da nebulosidade adopta-se o mesmo método usado nos pontos anteriores, fixando as restantes variáveis para ser possível tirar conclusões no que diz respeito apenas à influência da nebulosidade nas estruturas, fazendo-a variar para céu limpo, parcialmente coberto e céu coberto, respectivamente considerando a nebulosidade 0, 50 e 100%. Procede-se à análise considerando fixos os seguintes parâmetros:

- Temperatura de aplicação, 160°C;
- Temperatura da camada de base, 15°C;
- Temperatura do ar, 10°C;
- Vento moderado, 7m/s;
- $\lambda = 2,0 \text{ W/(m. } ^\circ\text{C)}$;
- $c = 869 \text{ J/(Kg. } ^\circ\text{C)}$;
- $\rho = 2350 \text{ Kg/m}^3$.

São obtidos, para as quatro estruturas consideradas, os gráficos apresentados nas Figuras 4.26, 4.27, 4.28 e 4.29, respectivamente para a estrutura 1,2,3 e 4.

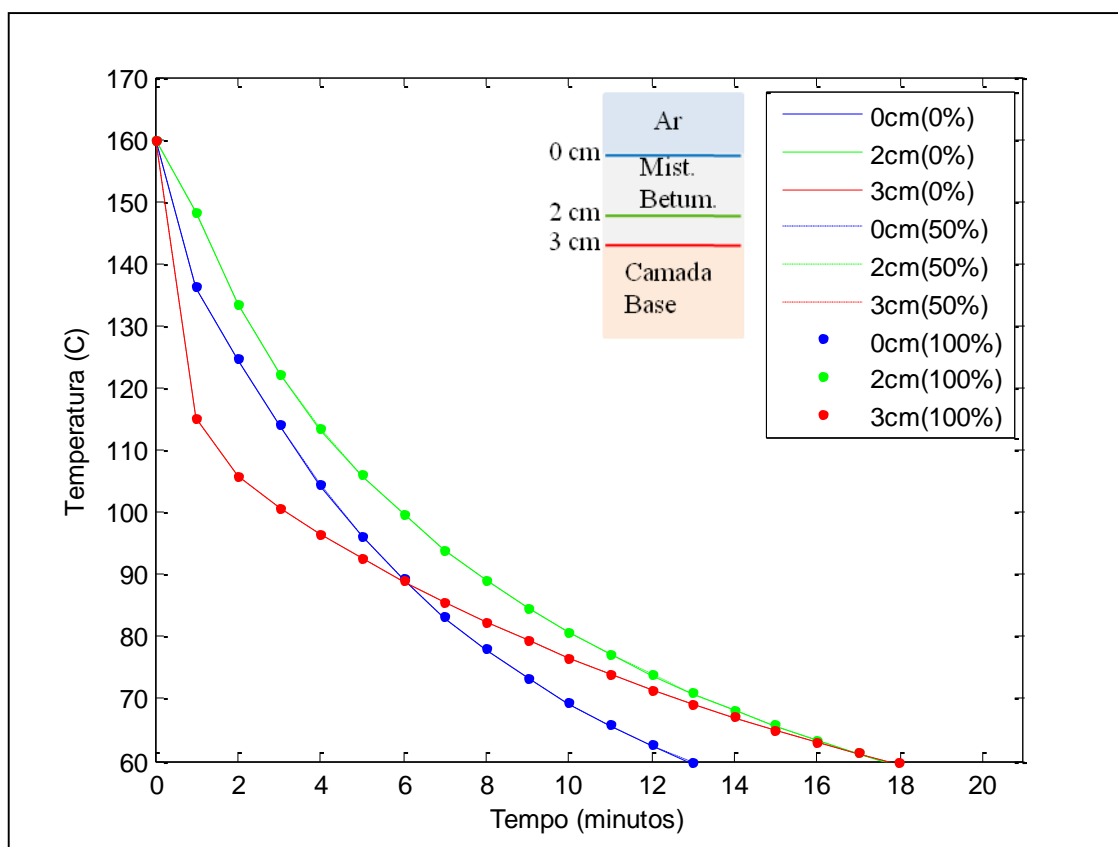


Figura 4.26 - Arrefecimento ao longo do tempo com variação da nebulosidade – Estrutura 1

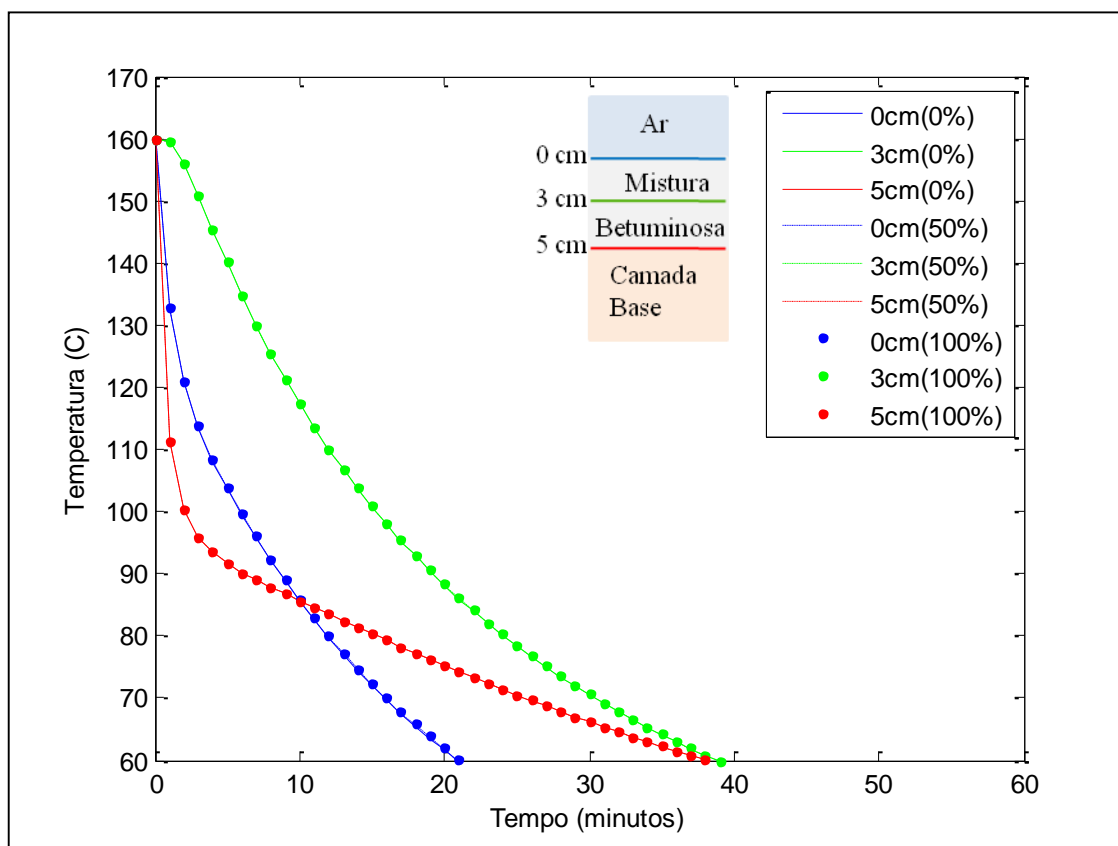


Figura 4.27 - Arrefecimento ao longo do tempo com variação da nebulosidade – Estrutura 2

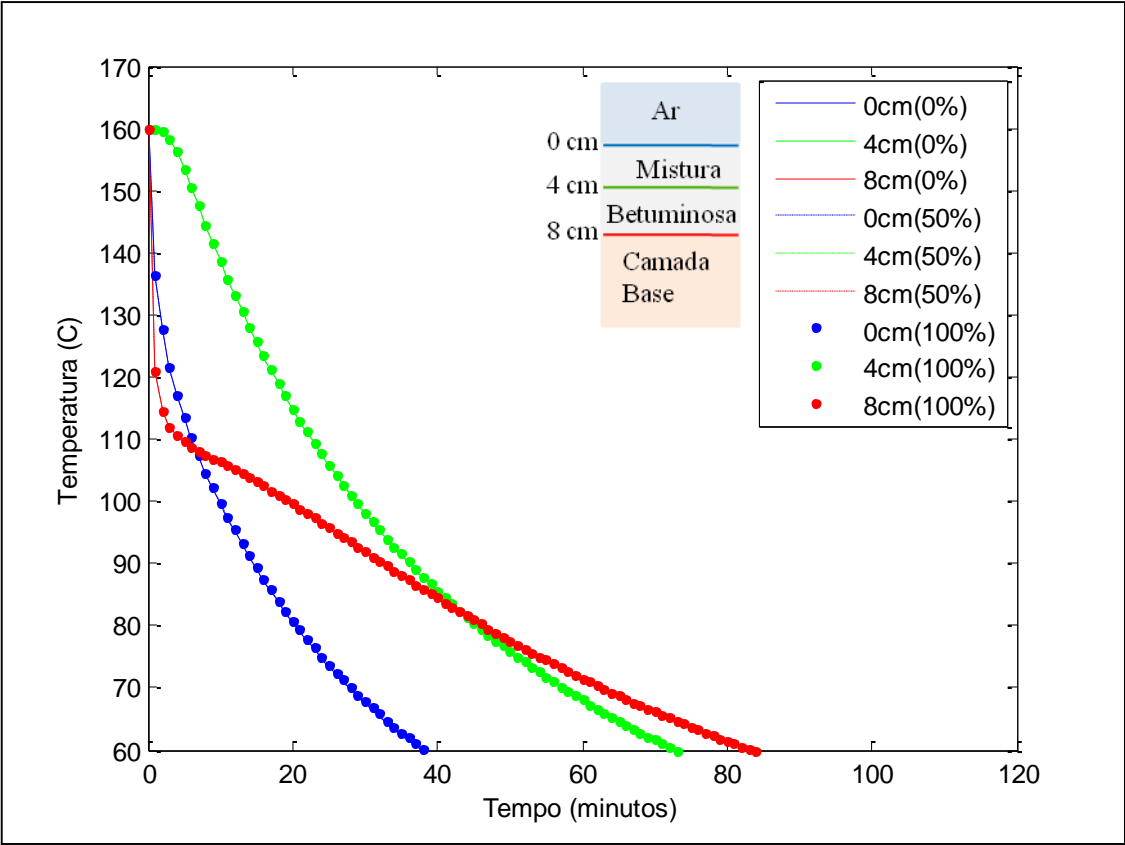


Figura 4.28 - Arrefecimento ao longo do tempo com variação da nebulosidade – Estrutura 3

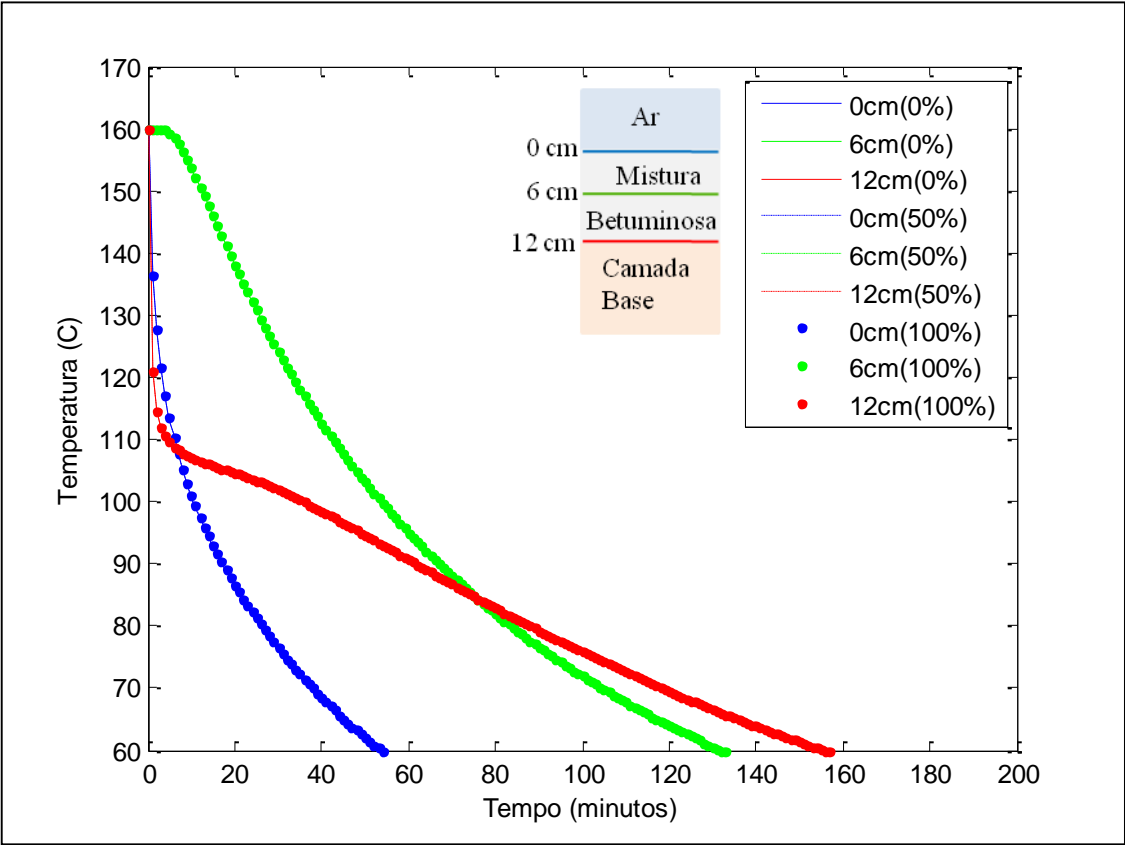


Figura 4.29 - Arrefecimento ao longo do tempo com variação da nebulosidade – Estrutura 4

Considerando os gráficos apresentados, concluiu-se que a nebulosidade não tem um efeito significativo na variação das curvas de arrefecimento. Têm uma maior influência à medida que a espessura aumenta, mas derivado do facto de aumentar consequentemente o tempo de arrefecimento.

De acordo com (Pilate, 2007), a nebulosidade influencia a temperatura do ar. Pelo que, foi aplicada a parametrização desenvolvida em (Dogniaux, 1983), para determinar a temperatura do ar num determinado dia do ano tendo em conta a influência da nebulosidade.

É de salientar que esta parametrização foi considerada no trabalho a partir das expressões desenvolvidas com o objectivo de simular as condições para a Bélgica. As condições são naturalmente diferentes da realidade Portuguesa. De qualquer forma, importa aplicar esta previsão para que seja possível obter uma noção do desvio que a nebulosidade pode causar nas temperaturas do ar.

Desta forma, estabelecendo o objectivo de prever as temperaturas do ar em quatro meses distintos (dia 15), Janeiro, Abril, Julho e Outubro para duas horas do dia, 8h e 15h. A expressão que indica a temperatura do ar é a seguinte.

$$T_{ar} = \frac{A+B\cos\omega t+C\cos 2\omega t+D\sin\omega t+E\sin 2\omega t}{10} \quad (4.4)$$

Onde, T_{ar} (°C) é a temperatura do ar, $\omega = \frac{2\pi}{24}$ e t o tempo universal (TU) em horas. A , B , C , D e E são os parâmetros das variações diárias a ter em conta, que são desenvolvidos em séries de Fourier. Um exemplo da determinação do parâmetro A é a expressão 4.5.

$$A = K + L\cos\omega j + M\cos 2\omega j + N\sin\omega j + P\sin 2\omega j \quad (4.5)$$

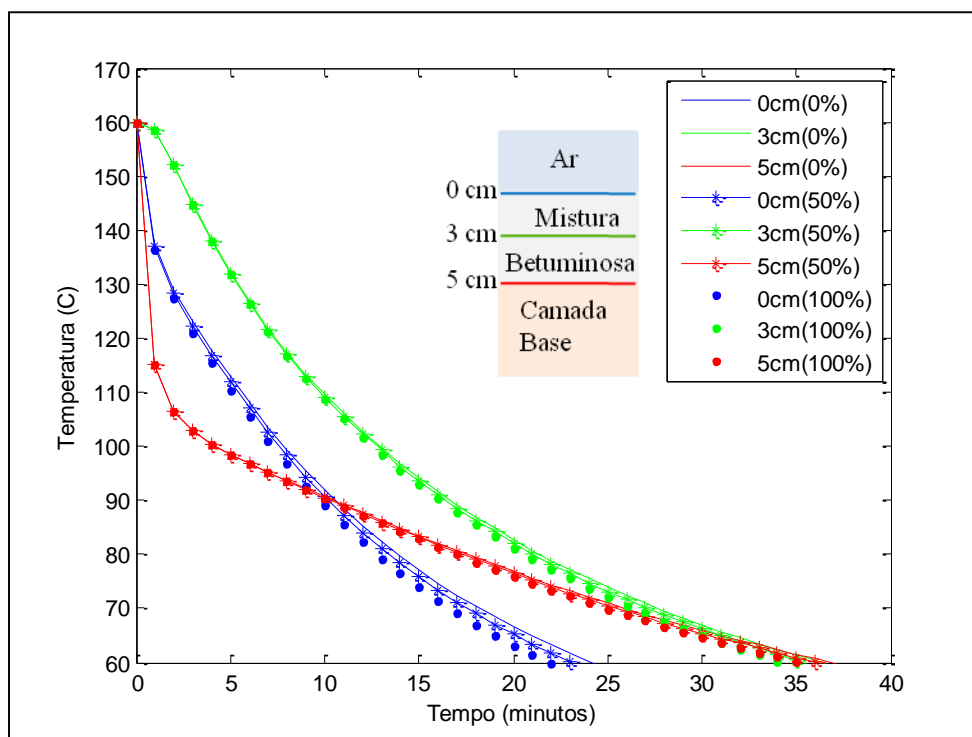
Sendo, $\omega = \frac{2\pi}{366}$ e j o número de dias do ano a contar do 1 de Janeiro. K , L , M , N e P são os parâmetros que dependem da nebulosidade.

Aplicando as expressões acima descritas foram obtidos os valores das temperaturas do ar previstas para os três tipos de nebulosidade considerados, céu limpo, céu parcialmente coberto e céu coberto, de acordo com o Quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Variação da temperatura do ar com a nebulosidade

Dia/Mês	T _{ar} céu limpo (°C)		T _{ar} céu parcialmente coberto (°C)		T _{ar} céu coberto (°C)	
	8h	15h	8h	15h	8h	15h
15 Jan.	-1,5	2,5	1,4	3,8	3,0	4,4
15 Abril	10,3	17,3	8,7	13,5	8,0	10,4
15 Julho	19,9	25,9	17,6	22	16,1	18,4
15 Out.	10,6	16,6	10,5	14,3	10,5	12,5

Interessante observar como dependendo do mês em que se considera a nebulosidade, esta vai afectar de forma diferente, quer aumentando quer diminuindo a temperatura do ar. A hora do dia, como esperado, afecta de uma forma bastante substancial a temperatura do ar, tendo também um peso fundamental no que diz respeito à relevância da nebulosidade pois em todos os meses se verifica uma menor variação das temperaturas do ar em relação às 15h. Isto deve-se ao facto de a incidência de radiação solar ser muito maior neste ultimo caso. A título de exemplo pode-se ver na figura 4.30, considerando a parametrização anterior, o resultado para a estrutura 2 em 15 de Abril às 15 horas, com diferentes nebulosidades.

Figura 4.30 – Variação da temperatura ao longo do tempo com a T_{ar} afectada pela nebulosidade às 15h

Efectuando a mesma análise também para a mesma estrutura 2 e com a mesma parametrização anterior mas agora para as 8h, de acordo com a Figura 4.31.

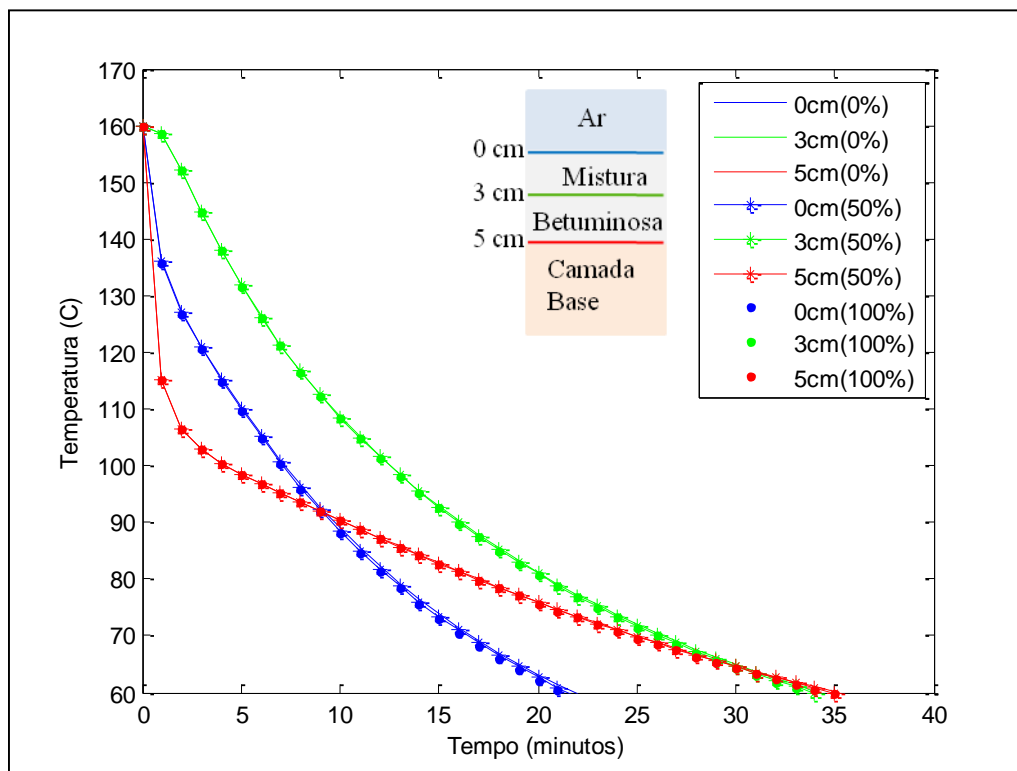


Figura 4.31 - Variação da temperatura ao longo do tempo com a T_{ar} afectada pela nebulosidade às 8h

Para uma hora matinal em que a incidência solar é muito reduzida, o efeito da nebulosidade não tem influência no arrefecimento. No caso em que a avaliação é feita às 15h, o facto de o céu estar nublado afecta as temperaturas do ar, e dada a maior exposição solar nesse horário pode concluir-se que a radiação assume aqui um papel importante.

4.7. Variação das condições dos materiais

4.7.1. Variação da temperatura de aplicação da mistura betuminosa

Na variação da temperatura de aplicação foi adoptado o mesmo método usado acima, fixando as restantes variáveis para ser possível tirar conclusões no que diz respeito apenas à influência da temperatura de aplicação nas estruturas. Para as temperaturas de aplicação considerando 160 e 150°C. Os restantes parâmetros são os seguintes:

- Temperatura da camada de base, 15°C;
- Temperatura do ar, 10°C;
- Vento moderado, 7m/s;
- Céu limpo;
- $\lambda = 2,0 \text{ W/(m. } ^\circ\text{C)}$;

- $c = 869 \text{ J/(Kg. } ^\circ\text{C)};$
- $\rho = 2350 \text{ Kg/m}^3.$

São obtidos, para as quatro estruturas consideradas, os gráficos apresentados nas Figuras 4.32, 4.33, 4.34 e 4.35, respectivamente para a estrutura 1,2,3 e 4.

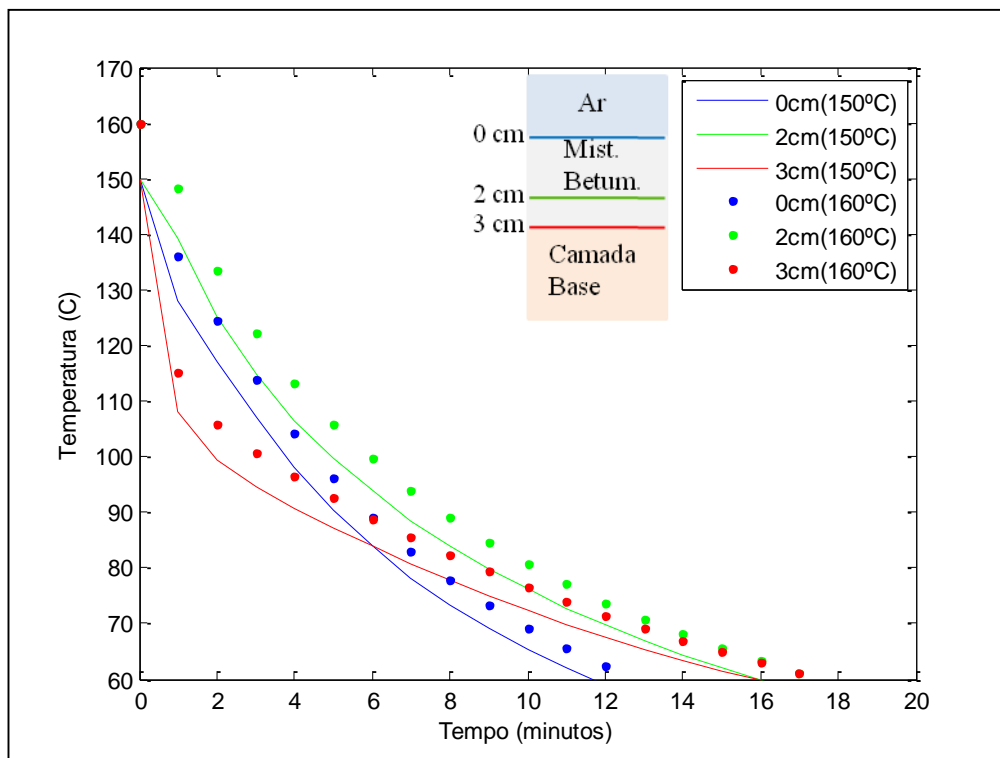


Figura 4.32 – Arrefecimento ao longo do tempo com variação da temperatura de aplicação – Estrutura 1

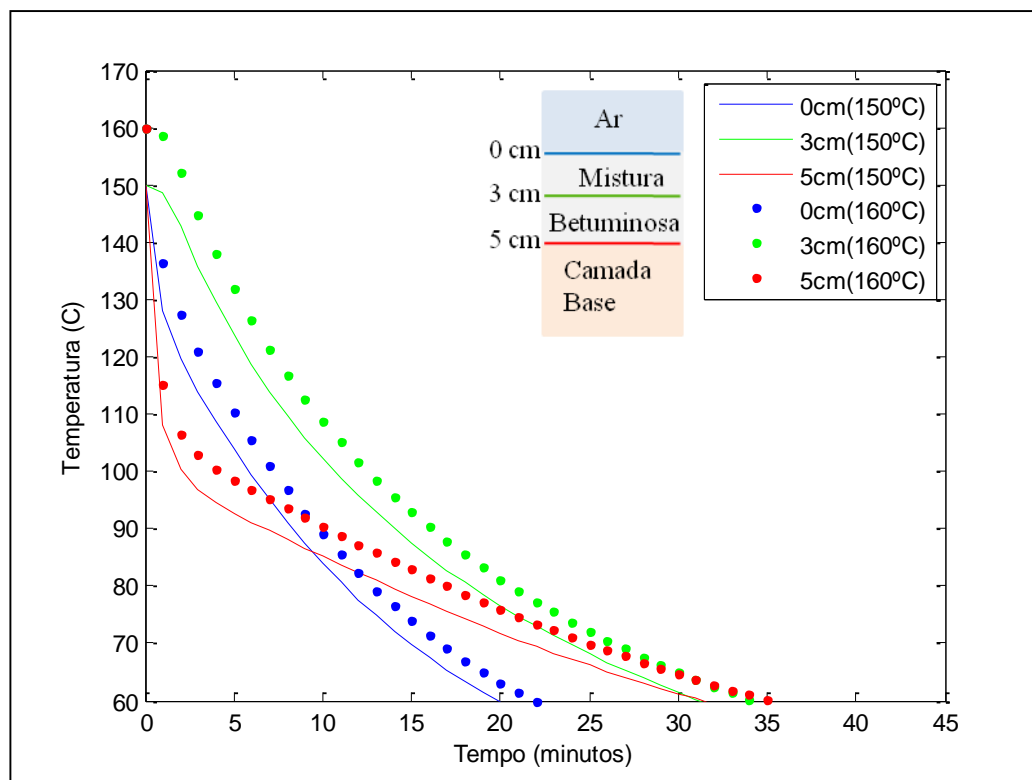


Figura 4.33 – Arrefecimento ao longo do tempo com variação da temperatura de aplicação – Estrutura 2

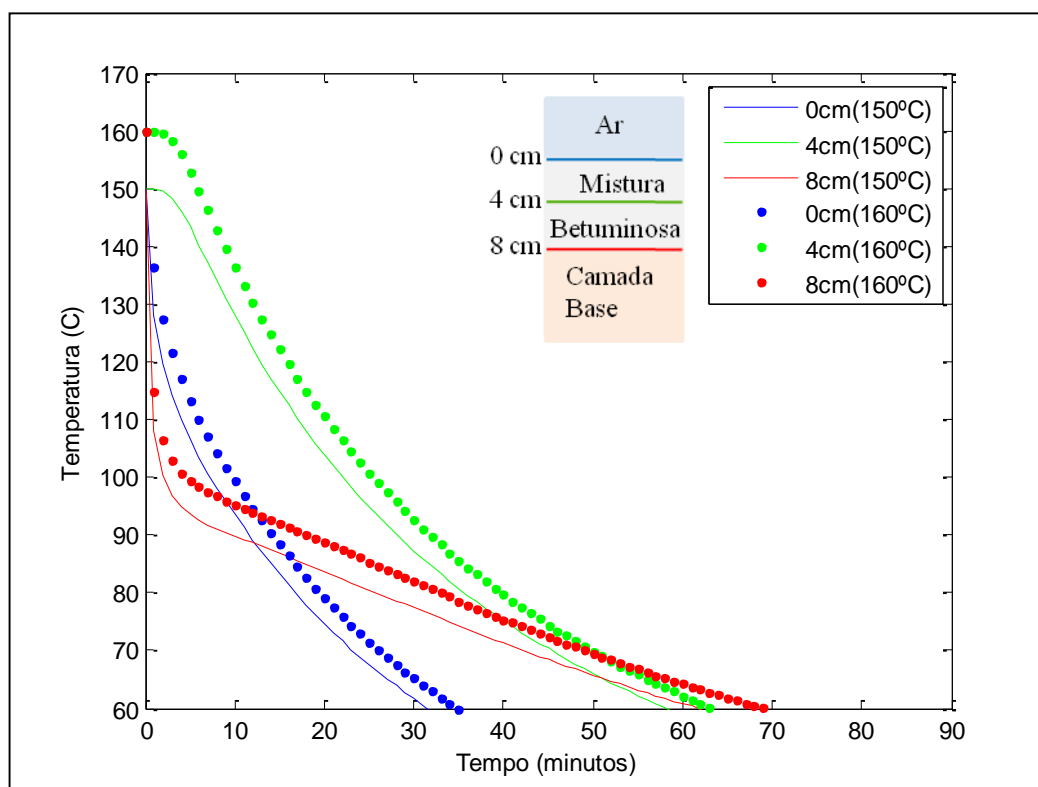


Figura 4.34 – Arrefecimento ao longo do tempo com variação da temperatura de aplicação – Estrutura 3

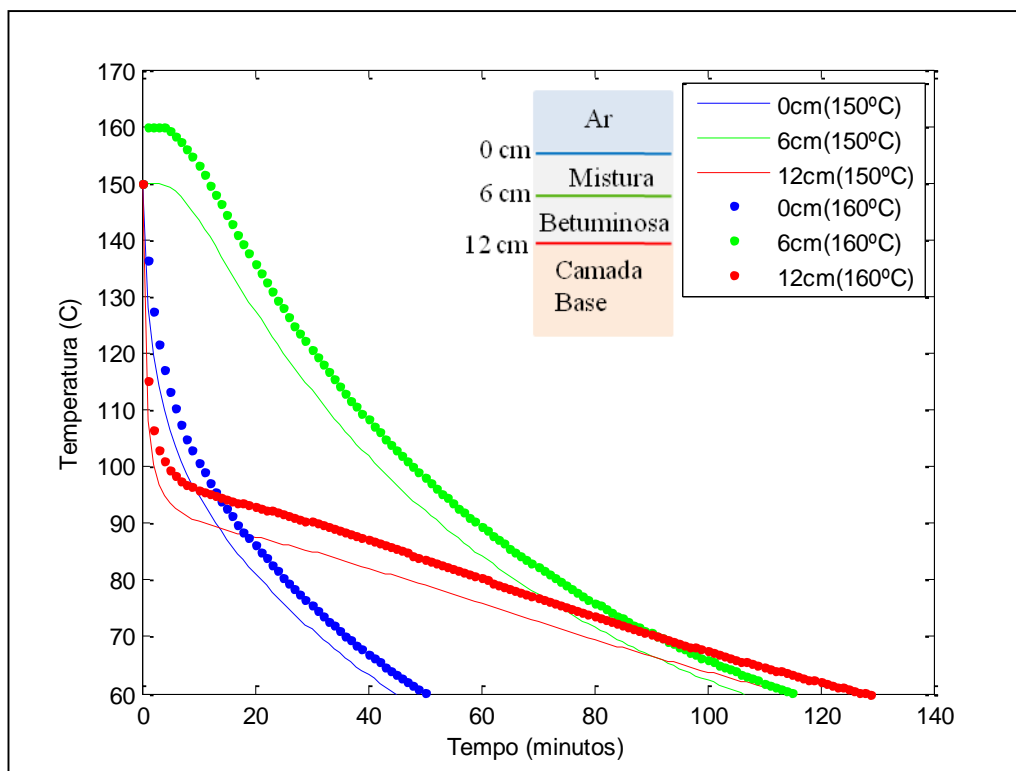


Figura 4.35 – Arrefecimento ao longo do tempo com variação da temperatura de aplicação – Estrutura 4

Fica claro que do ponto de vista de temperatura de aplicação em todos os casos se encontra um paralelismo entre as curvas de arrefecimento, podendo-se dizer que a temperatura de aplicação tem apenas o peso inicial de acordo com a diferença de temperatura de aplicação considerada, mantendo depois a amplitude ao longo de todo o arrefecimento.

4.7.2. Variação das características dos materiais

Para efectuar a análise com a variação das características dos materiais será necessário ter em conta o Quadro 4.3. Partindo do mesmo princípio anterior, em que se executa o modelo para as quatro estruturas de pavimento consideradas, com espessuras constantes, nesta situação a estrutura 1 será considerada com as características dos materiais da Mistura betuminosa A, variando as características da Camada de base descritas no Quadro 4.3. Da mesma forma, para as estruturas 2,3 e 4 as duas camadas assumem, respectivamente, as características da Mistura betuminosa B e a Camada de base, ambos conforme os valores disponíveis no Quadro 4.3.

Assim, para a estrutura 1 os valores a ter em conta, que caracteriza a mistura betuminosa com 3cm são:

- Condutibilidade térmica, 1,2 W/(m.°C);
- Calor específico, 921 J/(Kg.°C)
- Massa volúmica, 2400 Kg/m³

Para a camada de base ocorrerá a variação dos três últimos parâmetros da seguinte forma:

- Condutibilidade térmica, 1,3 e 2,0 W/(m.°C);

- Calor específico, 837 e 869 J/(Kg.°C)
- Massa volúmica, 1750 e 2350 Kg/m³

Os restantes dados de entrada permanecem fixos, a saber:

- Temperatura de aplicação, 160°C;
- Temperatura da camada de base, 15°C;
- Temperatura do ar, 10°C;
- Vento moderado, 7m/s;
- Céu limpo, 0% de nebulosidade.

A Figura 4.36 dá conta do arrefecimento na estrutura 1 de acordo com a parametrização anterior, variando apenas as propriedades da camada de base.

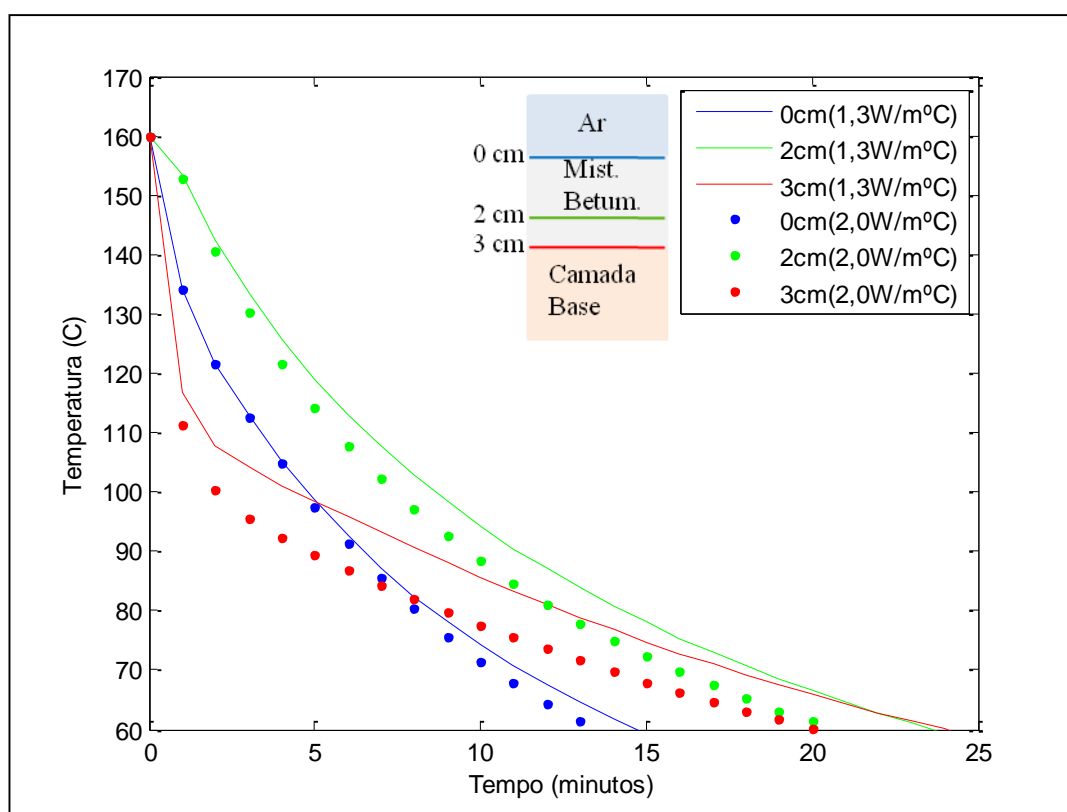


Figura 4.36 – Arrefecimento ao longo do tempo com variação das propriedades dos materiais – Estrutura 1

Numa primeira análise é claro que, como esperado, o arrefecimento acontece de uma forma substancialmente mais rápida para a situação em que o coeficiente de condutibilidade térmica é maior, podendo ter a percepção de que a diferença das propriedades dos materiais tem um peso considerável no arrefecimento.

No seguimento do que foi feito em cima, adopta-se o mesmo tipo de teste para a estrutura 2,3 e 4, embora de acordo com o Quadro 4.3, as propriedades do material usadas são as da Mistura betuminosa B, que fornece valores para espessuras de acordo com as estruturas a analisar. Assim, para a camada de mistura betuminosa foram utilizados os seguintes valores:

- Condutibilidade térmica, $2,0 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$;
- Calor específico, $869 \text{ J}/(\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C})$;
- Massa volúmica, $2350 \text{ Kg}/\text{m}^3$.

Enquanto a variação das propriedades da camada de base são as mesmas consideradas na análise anterior, de acordo com o Quadro 4.3, e os restantes parâmetros também com os mesmo valores acima referidos. Nas Figuras 4.37, 4.38 e 4.39, estão apresentados o arrefecimento ao longo do tempo previsto para as estruturas 2,3 e 4, respectivamente.

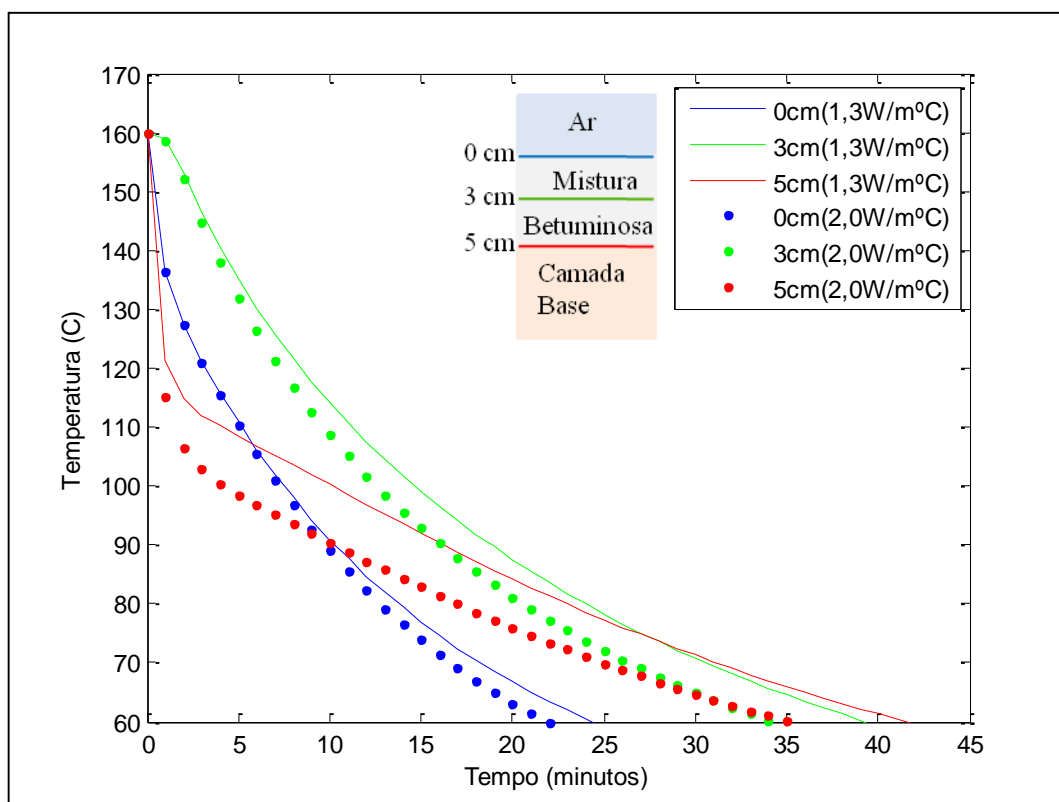


Figura 4.37 – Arrefecimento ao longo do tempo com variação das propriedades dos materiais – Estrutura 2

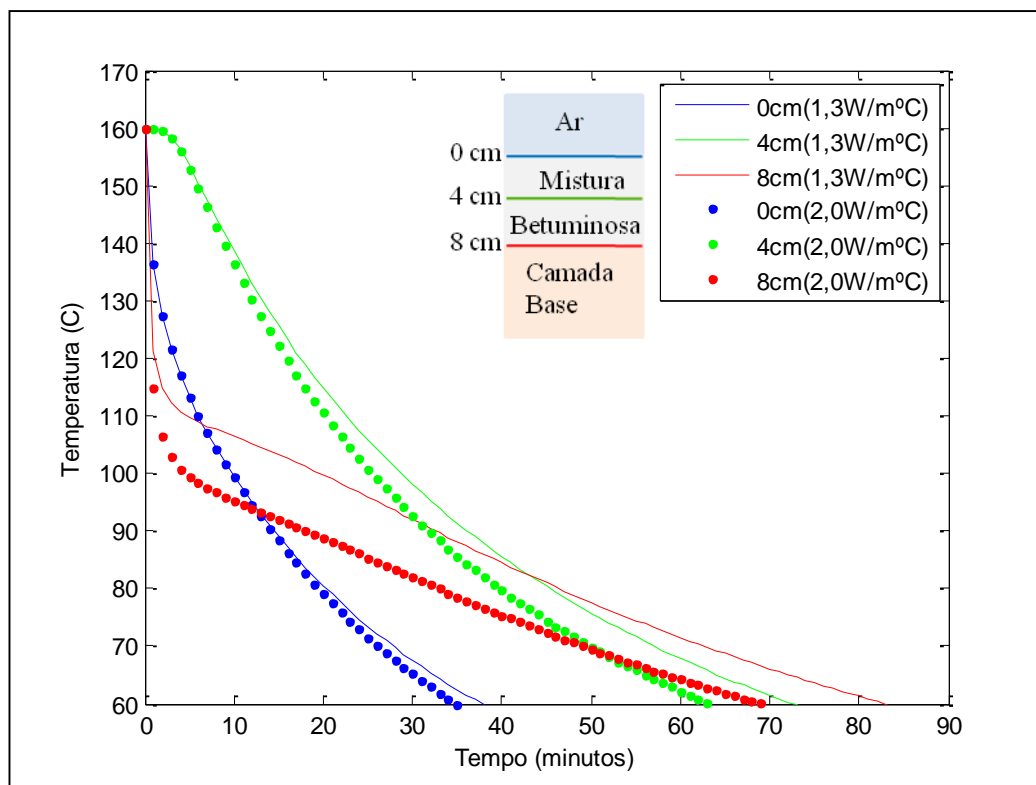


Figura 4.38 – Arrefecimento ao longo do tempo com variação das propriedades dos materiais – Estrutura 3

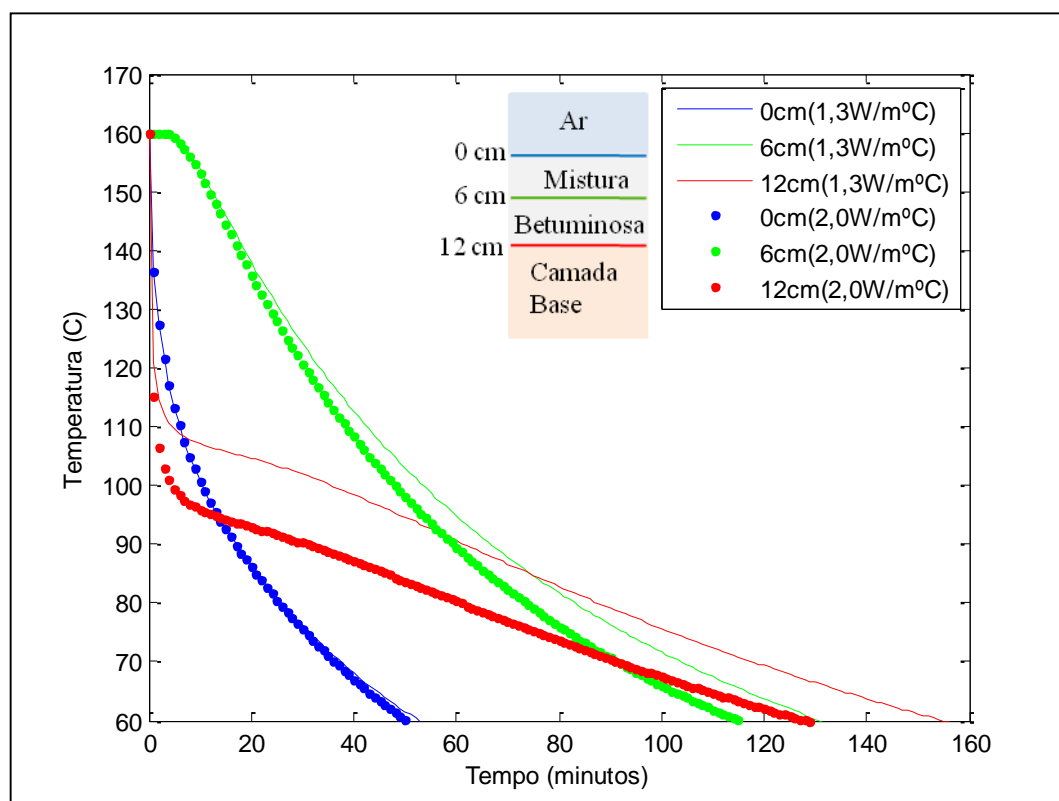


Figura 4.39 – Arrefecimento ao longo do tempo com variação das propriedades dos materiais – Estrutura 4

De notar pela observação dos gráficos anteriores que as características dos materiais, têm o seu peso fundamental no ponto de contacto com a base, uma vez que a descontinuidade de materiais e das suas propriedades térmicas se encontram neste ponto, faz sentido que assim seja. Essa alteração como é natural revela efeito no interior da camada, perdendo intensidade à superfície, onde para todas as estruturas revela pouca influência no que diz respeito ao arrefecimento.

4.8. Processo construtivo – Compactação

Neste subcapítulo é feita uma análise do efeito da compactação no tempo disponível para a compactação. As espessuras das camadas consideradas até então foram assumidas tendo em conta as suas dimensões finais, assim como, as características próprias do material, nomeadamente, a condutibilidade térmica, o calor específico e a massa volúmica. Segundo dados obtidos em laboratório (Chadbourn et al, 1998), para duas misturas betuminosas de granulometrias diferentes, para diferentes temperaturas e massas volúmicas. Para a mesma variação de temperatura nas duas misturas foi possível encontrar variações diferentes na massa volúmica e na condutibilidade térmica, tendo em conta a granulometria da mistura betuminosa. A Figura 4.40, ilustra os resultados obtidos, em que DG representa a mistura de granulometria contínua a baridade não parece afectar a condutibilidade térmica consideravelmente mas na mistura SMA que representa granulometria descontínua, praticamente duplica o valor de início. Quanto à variação do calor específico não foi possível encontrar referências por parte destes autores.

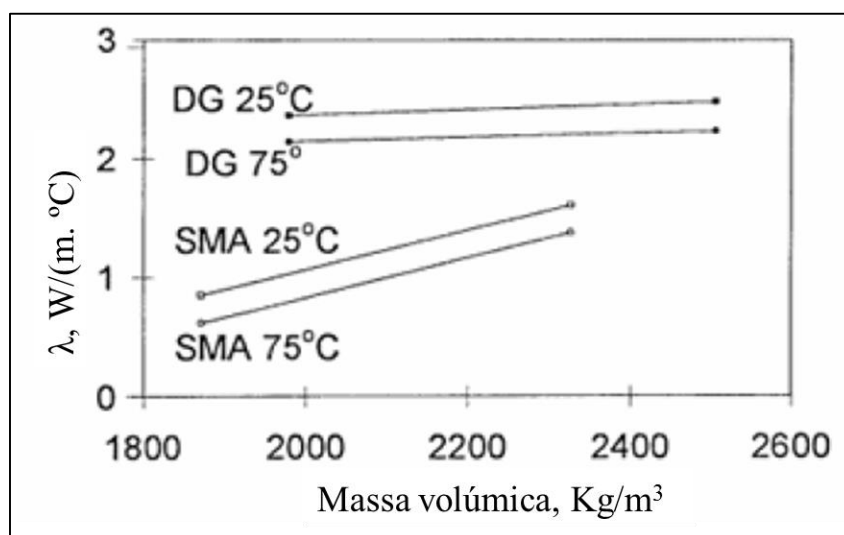


Figura 4.40 – Variação da condutibilidade térmica com a temperatura e massa volúmica para duas misturas betuminosas de granulometria diferente – (adaptado de (Chadbourn, Newcomb, & Voller, 1998))

Posto isto, considera-se razoável admitir nesta análise que para as misturas betuminosas aplicadas na estrutura 1 e 2 é importante afectar os valores da condutibilidade térmica antes e após a compactação.

Tendo em conta que a camada de mistura betuminosa aplicada antes da compactação é cerca de 20% mais espessa que a espessura final pretendida o Quadro 4.4 apresenta os valores a considerar nesta análise.

Quadro 4.7 – Características geométricas e térmicas dos materiais antes da compactação

Material	Espessura (cm)	λ (W/m.°C)	c (J/Kg.°C)	ρ (Kg/m ³)
Mistura betuminosa A	3,5 a 6,0	1,0	921	1920
Mistura betuminosa B	9,5 a 14,5	2,0	869	2350
Camada de base	20,0	1,31 a 2,0	837 a 869	1750 a 2350

O processo de análise tem a limitação de no modelo ser executada a compactação na sua totalidade ao minuto 10 de arrefecimento, critério que não revela a realidade do processo construtivo. Da mesma maneira, foi adoptada uma forma prática de obter as temperaturas após a compactação. Conhecidas que são as temperaturas em cada ponto da camada no instante anterior à compactação, os valores da camada compactada foram obtidos com base em médias ponderadas sobre os valores das temperaturas das camadas a suprimir com a compactação. A Figura 4.41 ilustra o método adoptado para chegar aos valores iniciais da camada compactada.

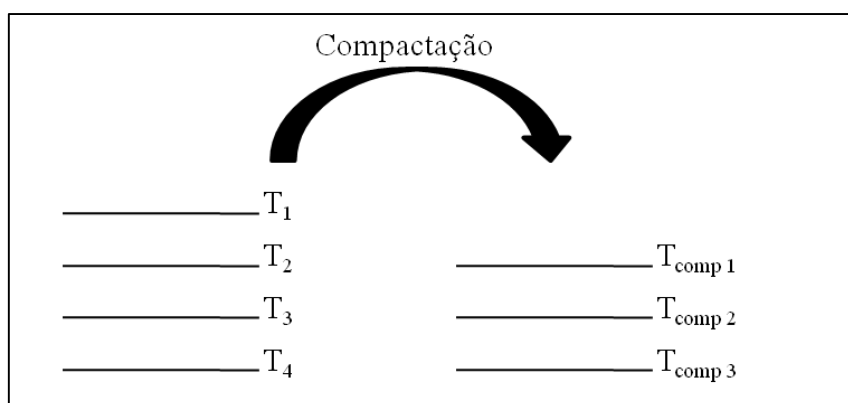


Figura 4.41 – Temperaturas após a compactação

T_x representa a temperatura no ponto da camada antes da compactação e $T_{comp\ x}$, o valor da temperatura após a compactação, determinados de acordo com as equações seguintes:

$$T_{comp\ 1} = T_1 \quad (4.6)$$

$$T_{comp\ 2} = (T_1 + 2T_2 + T_3)/4 \quad (4.7)$$

$$T_{comp\ 3} = T_4 \quad (4.8)$$

Assumindo as quatro estruturas anteriormente consideradas a avaliação do arrefecimento tendo em conta que os restantes dados de entrada permanecem fixos de acordo com os seguintes valores:

- Temperatura de aplicação, 160°C;
- Temperatura da camada de base, 15°C;
- Temperatura do ar, 10°C;
- Vento moderado, 7m/s;
- Céu limpo, 0% de nebulosidade.

As Figuras 4.42, 4.43, 4.44 e 4.45 dão conta do arrefecimento na estrutura 1, 2, 3 e 4 respectivamente, de acordo com a parametrização anterior, variando apenas as propriedades dos materiais de conforme o Quadro 4.4 para os primeiros 10 minutos e após a compactação voltam a ser considerados os valores referidos no Quadro 4.3.

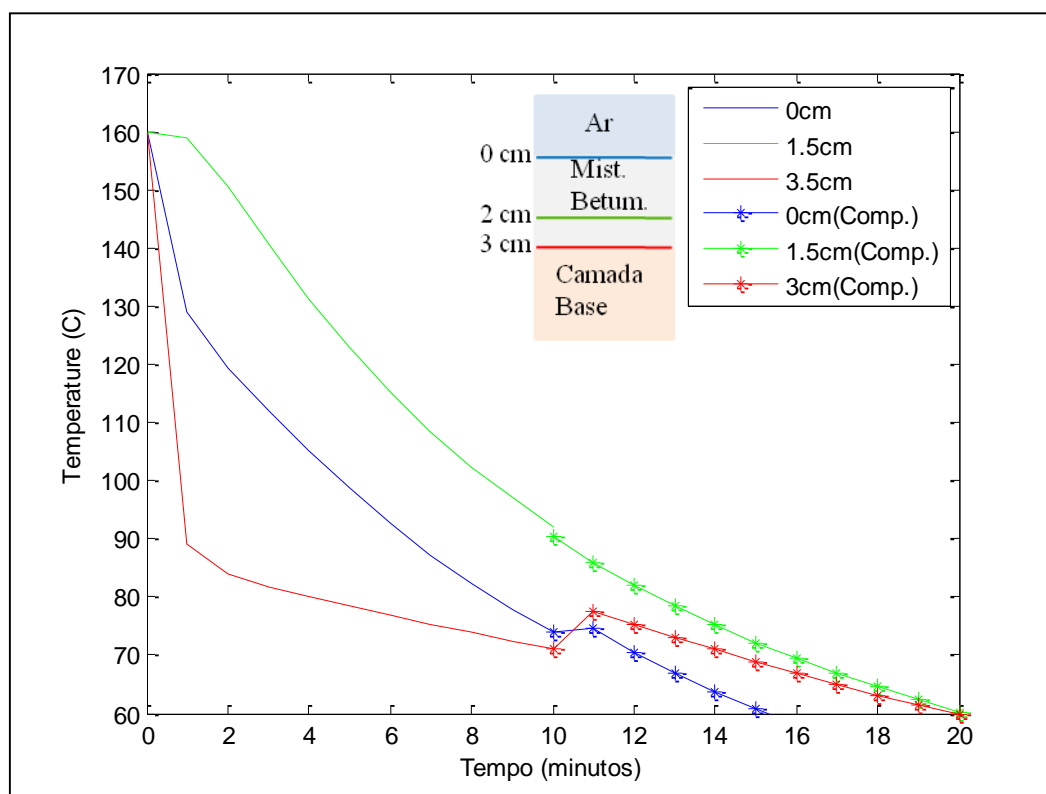


Figura 4.42 – Arrefecimento ao longo do tempo com compactação e variação das propriedades dos materiais – Estrutura 1

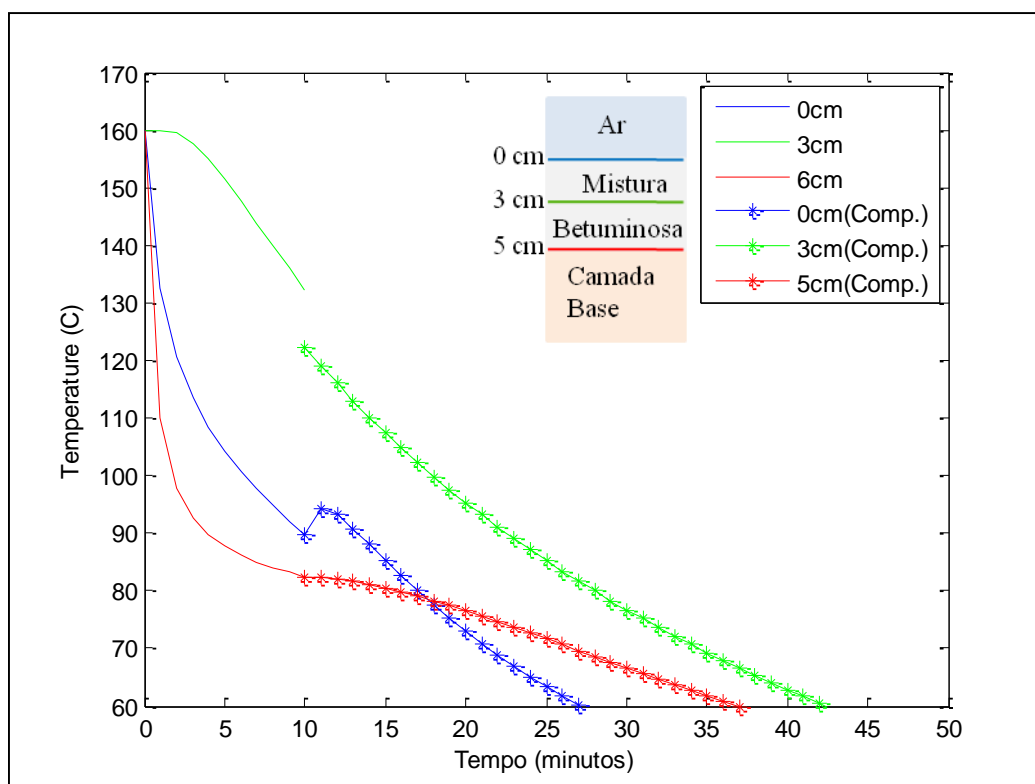


Figura 4.43 – Arrefecimento ao longo do tempo com compactação e variação das propriedades dos materiais – Estrutura 2

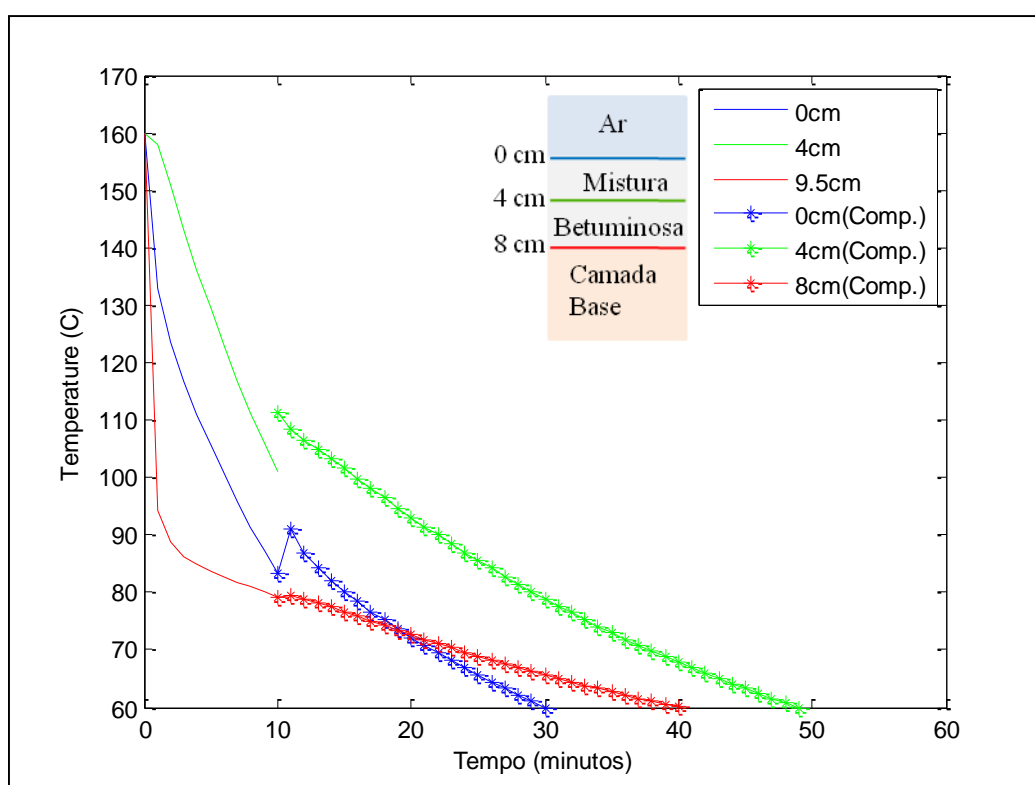


Figura 4.44 – Arrefecimento ao longo do tempo com compactação e variação das propriedades dos materiais – Estrutura 3

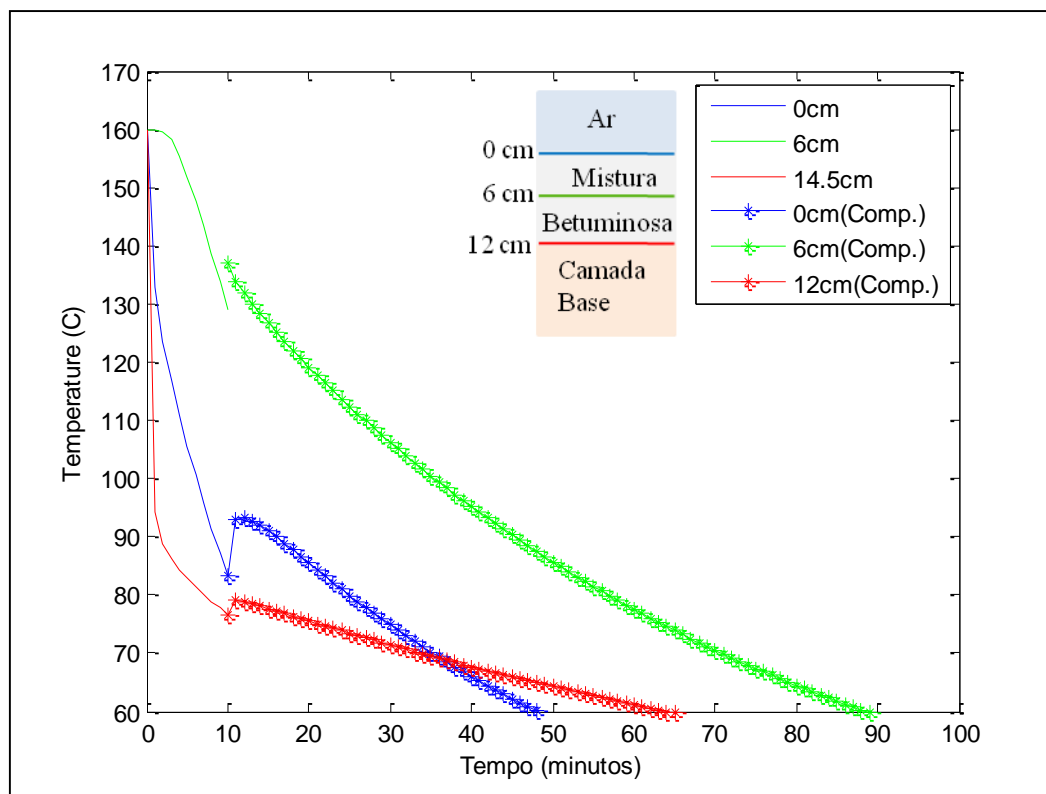


Figura 4.45 – Arrefecimento ao longo do tempo com compactação e variação das propriedades dos materiais – Estrutura 4

Após a compactação é comum a todos os casos um aumento da temperatura das extremidades da camada, contudo nas camadas mais finas, como as da estrutura 1 e 2 a no meio da camada provoca um decréscimo de temperatura, enquanto nas mais espessas verifica-se também um aumento da temperatura, este facto pode apenas ter um significado relevante no que diz respeito ao tempo para abertura ao tráfego. Para as camadas de espessura mais fina, como as da estrutura 1 e 2, o tempo entre a aplicação e a compactação não é de 10 minutos, pois a compactação no caso de camadas mais finas é aconselhável logo na sequência da pavimentação.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

Neste trabalho foi realizada uma análise paramétrica do processo de arrefecimento de misturas betuminosas na execução de pavimentos rodoviários com o propósito de determinar o tempo disponível para a compactação. Desenvolveu-se um modelo capaz de prever as trocas de calor no sistema.

Através de análises gráficas disponibilizadas pelo modelo, foi possível perceber qual a influência dos parâmetros que afectam o arrefecimento das camadas de betuminoso, tanto atmosféricos e geométricos, bem como as características térmicas do material.

Numa parametrização inicial foi possível detectar que a geometria das estruturas de pavimento tem uma influência preponderante no tempo disponível para a compactação, concluindo que as espessuras das camadas aplicadas são o principal factor a ter em conta em todas as análises.

Outra nota a ter em conta é o comportamento das zonas que delimitam as camadas, quer a de contacto com o ar, como a de contacto com a base. Ficou claro o poder da temperatura do ar, no sentido de influenciar a temperatura da camada de base e a sua relevância no que diz respeito à variação dos tempos disponíveis para a compactação. Tendo em conta estes factores importa frisar que em todas as avaliações foi possível concluir uma incapacidade considerável dos pontos limites das camadas serem sujeitas à compactação eficaz.

A velocidade do vento surge nestes testes como um dos principais parâmetros a ter em conta dada a grande amplitude de variação que proporciona nas curvas de arrefecimento, principalmente na superfície da camada, provoca alterações bruscas na temperatura logo após a aplicação, pondo em causa a compactabilidade adequada desta zona da mistura.

Com referência à radiação e aos seus efeitos, foi possível verificar uma influência determinante do ponto de vista da temperatura do ar, revelando variações consideráveis para meses do ano e horários do dia diferentes ficando comprovada a sua relevância no que diz respeito às condições de pavimentação.

Tendo em conta a análise que foi feita para várias geometrias e diferentes condições da envolvente, efectuou-se uma aproximação ao caso particular do procedimento construtivo. A compactação para além de modificar a geometria da camada de mistura betuminosa, altera também as propriedades térmicas do mesmo. Com recurso ao modelo desenvolvido, parametrizando as alterações impostas pela compactação, foi possível ver de que forma esta etapa da execução do pavimento influencia as trocas térmicas durante o processo.

Com a realização deste trabalho foi concretizado o objectivo de obter um modelo numérico, que pode ser testado para prever o arrefecimento de uma camada de mistura betuminosa aplicada, com base nas condições atmosféricas verificadas, bem como, tendo em conta as características geométricas e térmicas dos materiais envolvidos. O modelo desenvolvido executa esta previsão com base nos três fenómenos de transmissão térmica, condução, convecção e radiação.

5.2. Propostas de trabalhos futuros

O modelo desenvolvido deverá ser validado através de medições laboratoriais ou aplicado a casos reais a fim de ser verificada a sua adequabilidade.

Tanto no processo de determinação da temperatura da camada que irá receber o pavimento, como no efeito da nebulosidade na temperatura do ar, foi feita uma abordagem não adaptada à realidade portuguesa, pondo a descoberto a necessidade de desenvolver métodos que dêem conta dos valores adequados à realidade de Portugal.

Em relação às propriedades dos materiais, foi encontrada uma necessidade de ter acesso a medições conclusivas no que diz respeito às suas características térmicas, para que seja possível prever com mais fiabilidade os seus efeitos nas trocas de calor.

BIBLIOGRAFIA

- Branco, F., Pereira, P., & Santos, L. P. (2011). *Pavimentos Rodoviários*. Almedina.
- Çengel, Y. (1997). *Introduction to thermodynamics and heat transfer*. New York: McGraw-Hill.
- Çengel, Y. (1998). *Heat Transfer. A practical approach*. New York: McGraw-Hill.
- Chadbourn, B., Newcomb, D., & Voller, V. (1998). *An asphalt paving tool for adverse conditions*. Minnesota, USA: Department of Civil Engineering, report nº MN/RC-1998-18.
- Côté, J., & Konrad, J. -M. (2001). *Périodes à risques de givrage différentiel sur le territoire québécois: rapport CREIG-S2*. Laval, Canada: Université de Laval, Faculté des Sciences et de Génie, Département de Génie civil.
- De Backer, C. (1985). *Aires de stationnement pour véhicules sur toitures de bâtiments. Etude d'informations - Synthèse des expériences et connaissances actuelles*. Bruxelles: CR 26/85, Centre de recherches routières (CRR).
- Dogniaux, R. (1983). *Paramétrisation des variations horaires et journalières du rayonnement solaire global et de la température de l'air en Belgique*. Bruxelles: Institute Royal Météorologique de Belgique (IRM).
- Dogniaux, R. (1984). *De l'influence de l'estimation du facteur total de trouble atmosphérique sur l'évaluation du rayonnement solaire direct ci clair*. Bruxelles: Institut royal Météorologique de Belgique.
- Dynapac. (2014). *Dynapac/products*. Obtido em 16 de Maio de 2014, de atlascope: http://issuu.com/dynapac/docs/dynapac_mf2500_feeder__3492_0254_01/1?e=2057607/7046902
- Dynapac. (2014). *Dynapac/products*. Obtido em 16 de Maio de 2014, de atlascope: http://issuu.com/dynapac/docs/3492024401_cc800-1300_nvi/1?e=2057607/5525775
- Dynapac. (2014). *Dynapac/Products*. Obtido em 16 de Maio de 2014, de atlascope: <http://www.atlascope.pt/ptpt/products/navigationbyproduct/product.aspx?id=3523829&productgroupid=3523743>
- Frémond, M., Labbé, L., & Lassoued, R. (2002). Modélisation de la température de surface d'une chaussée à courte échéance par transfert de données météorologiques. *XIème Congrès International de la Viabilité hivernable*. Sapporo, Japon: AIPCR.
- Geest, D. (1970). *Thermische isolatie van brugdekken ter voorkoming van ijzel*. Revue C Tijdschrift, Volume V nº 5.
- Henriques, F. (2011). *Comportamento higrotérmico de edifícios*. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa.
- Incropera, F. P., Beergman, T. L., Lavine, A. S., & Dewitt, D. p. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass transfer*. USA: John Wiley & Sons.
- ipma. (2014). *Instituto Portugues do Mar e da Atmosfera*. Obtido em 15 de Março de 2014, de <http://www.ipma.pt/pt/>

- Martinho, F., Lanchas, S., Nunez, R., Batista, F., & Miranda, H. (2013). *A Experiência Portuguesa em Misturas Betuminosas do Tipo SMA com Fibras Celulósicas*. Lisboa: Congresso Rodoviário Português (CRP).
- Mauricio, J. (2001). Concrete Temperature Modeling and Strength Prediction using Maturity Concepts in the FHWA Hiperpav Software. *7th Internacional Conference of concrete Pavements*. Orlando, Florida, USA.
- Micaelo, R. (2009). *Compactação de misturas betuminosas - Ensaio de campo e modelação numérica*. Porto: FEUP.
- ONDLR. (1998). *Dictionnaire de l'entretien routier - Thème 4: Viabilité hivernale*. Metz, França: Ministère de l'Équipement, des transports et du Logement.
- Ongel, A., & Harvey, J. (Agosto de 2004). *Analys of 30 Years of Pavement Temperatures using the Enhanced Integrated Climate Model (EICM)*. California: Pavement Research Center Institute of Transportation Studies.
- Pérez, F., & Soto, J. (2006). *Manual de Pavimentação*. Barcelona: CEPESA.
- Philippe, A. (1967). Méthodes provisoires d'évaluation des profondeurs atteintes par le gel dans les sols et chaussées. *Bulletin de liaison des laboratoires routiers ponts e chaussées* (pp. n°28, p.1-30). Paris, França: Laboratoire central des ponts et Chaussées.
- Pilate, O. (2007). *Evolution de la température d'une couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée*. Bruxelles: Centre de recherches routières.
- Straub, A. L., Schenck, H. N., & Przybycien, F. E. (1968). *Bituminous Pavement Temperature related to Climate*. Washington DC, USA: HRB Record 256, p.53-77, Highway Research Board (HRB).
- Taine, J., & Petit, J.-P. (2003). *Transferts thermiques - introduction aux sciences des transferts*. Paris, France: 3e édition Dunod.
- Wolfe, R., & Heath, G. (1983). Cooling curve prediction of asphaltic concrete. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 109, pp. 137-147.

APÊNDICES

Modelo de cálculo geral

A modelação disponibilizada de seguida refere-se ao desenvolvimento do modelo numérico da estrutura 2 (3cm de camada de mistura betuminosa e 20 cm de camada de base)

```

clc
close all
clear all

% Calculo de T

% Definição de inputs
Ti=160;    %input('Temperatura de Aplicação = ');
Tar=18;    % Temperatura do ar (C°)
Tfund=15; % Temperatura da fundação (C°)
v=7;      % Velocidade do vento (m/s) '6m/s moderado'

%REGIME VARIAVEL

%Camada de Desgaste
% r=0.5;                                     % Radiação ainda nao entra
para o calculo
lambda1=1.2;                                % Condutibilidade Térmica
(W/m.C°)
c1=921;                                     % Calor especifico (J/kg.C°)
p1=2400;                                    % Massa volumica (Kg/m^3)
a1=lambda1/(p1*c1);                        % Difusividade térmica
(m^2/s)

h=(1.163*(4.84+3.36*v)*294.16)/(273.16+Tar); % Coeficiente de convec-
ção (W/m.C°)

alfa=0.85;                                 % Coeficiente de absorção da
radiação solar (art. beg.)
o=5.67*10^(-8);                            % Constante de Stephan-
Boltzmann (W/m^2.C°^4)
Gsol=0;                                    % Radiação solar global
E0=1-0.261*exp(0.000777*Tar^2);           % Emissividade para céu lim-
po
N=1;                                       % Nubelusidade (1-céu cober-
to;0,5-parcialmete;0-limpo)
Ea=E0*(1+0.12*N^2);                       % Emissividade para céu co-
berto
Ratm=Ea*o*(Tar+273.16)^4;                % Radiação atmosferica
Es=0.91;                                  % Emissividade da superfi-
cie (Betuminoso 0.92 artigo belga)

deltax=0.01;                              % Espaçamento entre nós (m)
deltat=15;                                % Intervalo de tempo (s)

Fo1=(a1*deltat)/deltax^2;
Bi=(h*deltax)/lambda1;

%Camada de base
lambda2=2.0;                              % Condutibilidade Térmica
(W/m.C°)
c2=869;                                    % Calor especifico (J/kg.C°)
p2=2350;                                   % Massa volumica (Kg/m^3)
a2=lambda2/(p2*c2);                       % Difusividade térmica
(m^2/s)

Fo2=(a2*deltat)/deltax^2;

```

```

%VECTORES
profundidade = [0:1:25];           % Vector profundidade
tempo = [0:1:600];                 % Vector tempo

%Temperatura de colocação da camada de betuminoso
T1=Ti;
T2=Ti;
T3=Ti;
T4=Ti;
T5=Ti;
T6=Ti;
Tfund1=Tfund;
Tfund2=Tfund;
Tfund3=Tfund;
Tfund4=Tfund;
Tfund5=Tfund;
Tfund6=Tfund;
Tfund7=Tfund;
Tfund8=Tfund;
Tfund9=Tfund;
Tfund10=Tfund;
Tfund11=Tfund;
Tfund12=Tfund;
Tfund13=Tfund;
Tfund14=Tfund;
Tfund15=Tfund;
Tfund16=Tfund;
Tfund17=Tfund;
Tfund18=Tfund;
Tfund19=Tfund;
Tfund20=Tfund;

% Matriz inicial

Temperatura=ones(26,2401);

Temperatura(:,1)=Ti;                % Temperatura na primeira colu-
na(tempo=0) é igual a Ti
Temperatura(7,1)=Tfund;
Temperatura(8,1)=Tfund;
Temperatura(9,1)=Tfund;
Temperatura(10,1)=Tfund;
Temperatura(11,1)=Tfund;
Temperatura(12,1)=Tfund;
Temperatura(13,1)=Tfund;
Temperatura(14,1)=Tfund;
Temperatura(15,1)=Tfund;
Temperatura(16,1)=Tfund;
Temperatura(17,1)=Tfund;
Temperatura(18,1)=Tfund;
Temperatura(19,1)=Tfund;
Temperatura(20,1)=Tfund;
Temperatura(21,1)=Tfund;
Temperatura(22,1)=Tfund;
Temperatura(23,1)=Tfund;
Temperatura(24,1)=Tfund;
Temperatura(25,1)=Tfund;
Temperatura(26,1)=Tfund;

```

```

% Equações baseadas no equilíbrio dos nós térmico - MDF
% Ciclo que define a posição(coluna)em que será guardado o valor da Temperatura calculado no ciclo seguinte
for t=2:2401
    T11=(1-2*Fo1-
2*Fo1*Bi)*T1+(T2+Bi*Tar)*2*Fo1+((a1*deltat*2)/lambda1*deltax^3)*alfa*Gsol+(
(2*deltat)/((lambda1/a1)*deltax))* (Ratm-Es*o*(T1+273.16)^4);
    T22=Fo1*(T1+T3)+(1-2*Fo1)*T2;
    T33=Fo1*(T2+T4)+(1-2*Fo1)*T3;
    T44=Fo1*(T3+T5)+(1-2*Fo1)*T4;
    T55=Fo1*(T4+T6)+(1-2*Fo1)*T5;

    T66=(deltat*lambda1)/(p2*c2*deltax^2)*(T5-T6)+Fo2*(Tfund1-T6)+T6;

    Tfund11=Fo2*(T6+Tfund2)+(1-2*Fo2)*Tfund1;
    Tfund22=Fo2*(Tfund1+Tfund3)+(1-2*Fo2)*Tfund2;
    Tfund33=Fo2*(Tfund2+Tfund4)+(1-2*Fo2)*Tfund3;
    Tfund44=Fo2*(Tfund3+Tfund5)+(1-2*Fo2)*Tfund4;
    Tfund55=Fo2*(Tfund4+Tfund6)+(1-2*Fo2)*Tfund5;
    Tfund66=Fo2*(Tfund5+Tfund7)+(1-2*Fo2)*Tfund6;
    Tfund77=Fo2*(Tfund6+Tfund8)+(1-2*Fo2)*Tfund7;
    Tfund88=Fo2*(Tfund7+Tfund9)+(1-2*Fo2)*Tfund8;
    Tfund99=Fo2*(Tfund8+Tfund10)+(1-2*Fo2)*Tfund9;
    Tfund1010=Fo2*(Tfund9+Tfund111)+(1-2*Fo2)*Tfund10;
    Tfund1111=Fo2*(Tfund10+Tfund12)+(1-2*Fo2)*Tfund111;
    Tfund1212=Fo2*(Tfund111+Tfund13)+(1-2*Fo2)*Tfund12;
    Tfund1313=Fo2*(Tfund12+Tfund14)+(1-2*Fo2)*Tfund13;
    Tfund1414=Fo2*(Tfund13+Tfund15)+(1-2*Fo2)*Tfund14;
    Tfund1515=Fo2*(Tfund14+Tfund16)+(1-2*Fo2)*Tfund15;
    Tfund1616=Fo2*(Tfund15+Tfund17)+(1-2*Fo2)*Tfund16;
    Tfund1717=Fo2*(Tfund16+Tfund18)+(1-2*Fo2)*Tfund17;
    Tfund1818=Fo2*(Tfund17+Tfund19)+(1-2*Fo2)*Tfund18;
    Tfund1919=Fo2*(Tfund18+Tfund20)+(1-2*Fo2)*Tfund19;
    Tfund2020=15;

    T1=T11; % Define a inclusão do valor calcula-
do do próximo valor
    Temperatura(1,t)=T11; % Define a substituição na matriz
inicial todos os valores na sua posição
    T2=T22;
    Temperatura(2,t)=T22;
    T3=T33;
    Temperatura(3,t)=T33;
    T4=T44;
    Temperatura(4,t)=T44;
    T5=T55;
    Temperatura(5,t)=T55;
    T6=T66;
    Temperatura(6,t)=T66;
    Tfund1=Tfund11;
    Temperatura(7,t)=Tfund11;
    Tfund2=Tfund22;
    Temperatura(8,t)=Tfund22;
    Tfund3=Tfund33;
    Temperatura(9,t)=Tfund33;
    Tfund4=Tfund44;
    Temperatura(10,t)=Tfund44;
    Tfund5=Tfund55;
    Temperatura(11,t)=Tfund55;
    Tfund6=Tfund66;

```

```

Temperatura(12,t)=Tfund66;
Tfund7=Tfund77;
Temperatura(13,t)=Tfund77;
Tfund8=Tfund88;
Temperatura(14,t)=Tfund88;
Tfund9=Tfund99;
Temperatura(15,t)=Tfund99;
Tfund10=Tfund1010;
Temperatura(16,t)=Tfund1010;
Tfund111=Tfund1111;
Temperatura(17,t)=Tfund1111;
Tfund12=Tfund1212;
Temperatura(18,t)=Tfund1212;
Tfund13=Tfund1313;
Temperatura(19,t)=Tfund1313;
Tfund14=Tfund1414;
Temperatura(20,t)=Tfund1414;
Tfund15=Tfund1515;
Temperatura(21,t)=Tfund1515;
Tfund16=Tfund1616;
Temperatura(22,t)=Tfund1616;
Tfund17=Tfund1717;
Temperatura(23,t)=Tfund1717;
Tfund18=Tfund1818;
Temperatura(24,t)=Tfund1818;
Tfund19=Tfund1919;
Temperatura(25,t)=Tfund1919;
Tfund20=Tfund2020;
Temperatura(26,t)=Tfund2020;

end

Temperatura;

Temperaturamin=Temperatura(:,1:4:2401);

%Plot em corte
figure(1)
plot(tempo,Temperaturamin(1,:), 'b',tempo,Temperaturamin(4,:), 'g',tempo,Temperaturamin(6,:), 'r')
xlabel('Tempo (minutos)'); ylabel('Temperatura (C)');
legend('0cm', '3cm', '5cm')
axis ([0 50 60 170])

%Plot ao longo do tempo
figure(2)
plot(Temperaturamin(:,1),profundidade,Temperaturamin(:,10),profundidade,Temperaturamin(:,30),profundidade,Temperaturamin(:,60),profundidade,Temperaturamin(:,120),profundidade,Temperaturamin(:,600),profundidade)
xlabel('Temperatura (C)'); ylabel('Profundidade (cm)');
legend('0min', '10min', '30min', '1h', '2h', '10h')
axis ([0 180 0 25]) % Define o tamanho da janela
set(gca, 'ydir', 'reverse'); % Inverte os eixos
set(gca, 'ytick', [0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25]); % Define o espaçamento do eixo y
set(gca, 'ygrid', 'on'); % Define as linhas no eixo

```

Modelo com o efeito da compactação

É apresentada neste apêndice a modelação executada para sobrepor o efeito da compactação à modelação geral. Também neste caso é apresentado o modelo numérico desenvolvido para a estrutura 2.

%% APÓS COMPACTAÇÃO %%%

%REGIME VARIÁVEL

%Camada de Desgaste

lambda11=1.2;

(W/m.C°)

c11=921;

p11=2400;

a11=lambda11/(p11*c11);

(m^2/s)

% Condutibilidade Térmica

% Calor específico (J/kg.C°)

% Massa volumica (Kg/m^3)

% Difusividade térmica

deltax=0.01;

deltat=15;

% Espaçamento entre nós (m)

% Intervalo de tempo (s)

Fo11=(a11*deltat)/deltax^2;

Bi=(h*deltax)/lambda11;

%Camada de base

lambda2=2.0;

(W/m.C°)

c2=869;

p2=2350;

a2=lambda2/(p2*c2);

(m^2/s)

% Condutibilidade Térmica

% Calor específico (J/kg.C°)

% Massa volumica (Kg/m^3)

% Difusividade térmica

Fo2=(a2*deltat)/deltax^2;

Temperaturacomp=ones(26,2401);

Temperaturacomp(1,1)=Temperatura(1,41);

Temperatura-

comp(2,1)=(Temperatura(2,41)+2*Temperatura(3,41)+Temperatura(4,41))/4;

Temperatura-

comp(3,1)=(Temperatura(3,41)+2*Temperatura(4,41)+Temperatura(5,41))/4;

Temperatura-

comp(4,1)=(Temperatura(4,41)+2*Temperatura(5,41)+Temperatura(6,41))/4;

Temperatura-

comp(5,1)=(Temperatura(5,41)+2*Temperatura(6,41)+Temperatura(7,41))/4;

Temperaturacomp(6,1)=Temperatura(7,41);

Temperaturacomp(7,1)=Temperatura(8,41);

Temperaturacomp(8,1)=Temperatura(9,41);

Temperaturacomp(9,1)=Temperatura(10,41);

Temperaturacomp(10,1)=Temperatura(11,41);

Temperaturacomp(11,1)=Temperatura(12,41);

Temperaturacomp(12,1)=Temperatura(13,41);

Temperaturacomp(13,1)=Temperatura(14,41);

Temperaturacomp(14,1)=Temperatura(15,41);

Temperaturacomp(15,1)=Temperatura(16,41);

Temperaturacomp(16,1)=Temperatura(17,41);

Temperaturacomp(17,1)=Temperatura(18,41);

Temperaturacomp(18,1)=Temperatura(19,41);

Temperaturacomp(19,1)=Temperatura(20,41);

Temperaturacomp(20,1)=Temperatura(21,41);

Temperaturacomp(21,1)=Temperatura(22,41);

Temperaturacomp(22,1)=Temperatura(23,41);

Temperaturacomp(23,1)=Temperatura(24,41);

Temperaturacomp(24,1)=Temperatura(25,41);

Temperaturacomp(25,1)=Temperatura(26,41);

```

Temperaturacomp(26,1)=Temperatura(27,41);

Tcomp1=Temperaturacomp(1,1);
Tcomp2=Temperaturacomp(2,1);
Tcomp3=Temperaturacomp(3,1);
Tcomp4=Temperaturacomp(4,1);
Tcomp5=Temperaturacomp(5,1);
Tcomp6=Temperaturacomp(6,1);
Tfundcomp1=Temperaturacomp(7,1);
Tfundcomp2=Temperaturacomp(8,1);
Tfundcomp3=Temperaturacomp(9,1);
Tfundcomp4=Temperaturacomp(10,1);
Tfundcomp5=Temperaturacomp(11,1);
Tfundcomp6=Temperaturacomp(12,1);
Tfundcomp7=Temperaturacomp(13,1);
Tfundcomp8=Temperaturacomp(14,1);
Tfundcomp9=Temperaturacomp(15,1);
Tfundcomp10=Temperaturacomp(16,1);
Tfundcomp11=Temperaturacomp(17,1);
Tfundcomp12=Temperaturacomp(18,1);
Tfundcomp13=Temperaturacomp(19,1);
Tfundcomp14=Temperaturacomp(20,1);
Tfundcomp15=Temperaturacomp(21,1);
Tfundcomp16=Temperaturacomp(22,1);
Tfundcomp17=Temperaturacomp(23,1);
Tfundcomp18=Temperaturacomp(24,1);
Tfundcomp19=Temperaturacomp(25,1);
Tfundcomp20=Temperaturacomp(26,1);

for t=2:2361
    Tcomp11=(1-2*Fo11-
2*Fo11*Bi)*Tcomp1+(Tcomp2+Bi*Tar)*2*Fo11+((a11*deltat*2)/lambda11*deltax^3)
*alfa*Gsol+((2*deltat)/((lambda11/a11)*deltax))*(Ratm-Es*o*(T1+273.16)^4);
    Tcomp22=Fo11*(Tcomp1+Tcomp3)+(1-2*Fo11)*Tcomp2;
    Tcomp33=Fo11*(Tcomp2+Tcomp4)+(1-2*Fo11)*Tcomp3;
    Tcomp44=Fo11*(Tcomp3+Tcomp5)+(1-2*Fo11)*Tcomp4;
    Tcomp55=Fo11*(Tcomp4+Tcomp6)+(1-2*Fo11)*Tcomp5;

    Tcomp66=(deltat*lambda11)/(p2*c2*deltax^2)*(Tcomp5-
Tcomp6)+Fo2*(Tfundcomp1-Tcomp6)+Tcomp6;

    Tfundcomp11=Fo2*(Tcomp6+Tfundcomp2)+(1-2*Fo2)*Tfundcomp1;
    Tfundcomp22=Fo2*(Tfundcomp1+Tfundcomp3)+(1-2*Fo2)*Tfundcomp2;
    Tfundcomp33=Fo2*(Tfundcomp2+Tfundcomp4)+(1-2*Fo2)*Tfundcomp3;
    Tfundcomp44=Fo2*(Tfundcomp3+Tfundcomp5)+(1-2*Fo2)*Tfundcomp4;
    Tfundcomp55=Fo2*(Tfundcomp4+Tfundcomp6)+(1-2*Fo2)*Tfundcomp5;
    Tfundcomp66=Fo2*(Tfundcomp5+Tfundcomp7)+(1-2*Fo2)*Tfundcomp6;
    Tfundcomp77=Fo2*(Tfundcomp6+Tfundcomp8)+(1-2*Fo2)*Tfundcomp7;
    Tfundcomp88=Fo2*(Tfundcomp7+Tfundcomp9)+(1-2*Fo2)*Tfundcomp8;
    Tfundcomp99=Fo2*(Tfundcomp8+Tfundcomp10)+(1-2*Fo2)*Tfundcomp9;
    Tfundcomp1010=Fo2*(Tfundcomp9+Tfundcomp11)+(1-2*Fo2)*Tfundcomp10;
    Tfundcomp1111=Fo2*(Tfundcomp10+Tfundcomp12)+(1-2*Fo2)*Tfundcomp11;
    Tfundcomp1212=Fo2*(Tfundcomp11+Tfundcomp13)+(1-2*Fo2)*Tfundcomp12;
    Tfundcomp1313=Fo2*(Tfundcomp12+Tfundcomp14)+(1-2*Fo2)*Tfundcomp13;
    Tfundcomp1414=Fo2*(Tfundcomp13+Tfundcomp15)+(1-2*Fo2)*Tfundcomp14;
    Tfundcomp1515=Fo2*(Tfundcomp14+Tfundcomp16)+(1-2*Fo2)*Tfundcomp15;
    Tfundcomp1616=Fo2*(Tfundcomp15+Tfundcomp17)+(1-2*Fo2)*Tfundcomp16;
    Tfundcomp1717=Fo2*(Tfundcomp16+Tfundcomp18)+(1-2*Fo2)*Tfundcomp17;
    Tfundcomp1818=Fo2*(Tfundcomp17+Tfundcomp19)+(1-2*Fo2)*Tfundcomp18;

```

```
Tfundcomp1919=Fo2*(Tfundcomp18+Tfundcomp20)+(1-2*Fo2)*Tfundcomp19;  
Tfundcomp2020=15;
```

```
Tcomp1=Tcomp11;  
Temperaturacomp(1,t)=Tcomp11;  
Tcomp2=Tcomp22;  
Temperaturacomp(2,t)=Tcomp22;  
Tcomp3=Tcomp33;  
Temperaturacomp(3,t)=Tcomp33;  
Tcomp4=Tcomp44;  
Temperaturacomp(4,t)=Tcomp44;  
Tcomp5=Tcomp55;  
Temperaturacomp(5,t)=Tcomp55;  
Tcomp6=Tcomp66;  
Temperaturacomp(6,t)=Tcomp66;  
Tfundcomp1=Tfundcomp11;  
Temperaturacomp(7,t)=Tfundcomp11;  
Tfundcomp2=Tfundcomp22;  
Temperaturacomp(8,t)=Tfundcomp22;  
Tfundcomp3=Tfundcomp33;  
Temperaturacomp(9,t)=Tfundcomp33;  
Tfundcomp4=Tfundcomp44;  
Temperaturacomp(10,t)=Tfundcomp44;  
Tfund5=Tfund55;  
Temperaturacomp(11,t)=Tfundcomp55;  
Tfundcomp6=Tfundcomp66;  
Temperaturacomp(12,t)=Tfundcomp66;  
Tfundcomp7=Tfundcomp77;  
Temperaturacomp(13,t)=Tfundcomp77;  
Tfundcomp8=Tfundcomp88;  
Temperaturacomp(14,t)=Tfundcomp88;  
Tfundcomp9=Tfundcomp99;  
Temperaturacomp(15,t)=Tfundcomp99;  
Tfundcomp10=Tfundcomp1010;  
Temperaturacomp(16,t)=Tfundcomp1010;  
Tfundcomp111=Tfundcomp1111;  
Temperaturacomp(17,t)=Tfundcomp1111;  
Tfundcomp12=Tfundcomp1212;  
Temperaturacomp(18,t)=Tfundcomp1212;  
Tfundcomp13=Tfundcomp1313;  
Temperaturacomp(19,t)=Tfundcomp1313;  
Tfundcomp14=Tfundcomp1414;  
Temperaturacomp(20,t)=Tfundcomp1414;  
Tfundcomp15=Tfundcomp1515;  
Temperaturacomp(21,t)=Tfundcomp1515;  
Tfundcomp16=Tfundcomp1616;  
Temperaturacomp(22,t)=Tfundcomp1616;  
Tfundcomp17=Tfundcomp1717;  
Temperaturacomp(23,t)=Tfundcomp1717;  
Tfundcomp18=Tfundcomp1818;  
Temperaturacomp(24,t)=Tfundcomp1818;  
Tfundcomp19=Tfundcomp1919;  
Temperaturacomp(25,t)=Tfundcomp1919;  
Tfundcomp20=Tfundcomp2020;  
Temperaturacomp(26,t)=Tfundcomp2020;
```

```
end
```

```
Temperaturacomp;
```

```
Temperaturacompmin=Temperaturacomp(:,1:4:2361);
```

```

figure(1)
plot(tempo, Temperatramin(1,:), 'b', tempo, Temperatramin(4,:), 'g', tempo, Temperatramin(7,:), 'r', tempocomp, Temperaturacompmin(1,:), 'b-
*', tempocomp, Temperaturacompmin(4,:), 'g-
*', tempocomp, Temperaturacompmin(6,:), 'r-*)
xlabel('Tempo (minutos)'); ylabel('Temperature (C)');
legend('0cm', '3cm', '6cm', '0cm(Comp.)', '3cm(Comp.)', '5cm(Comp.)')
axis ([0 50 60 170])

```

```

figure(2)
plot(Temperatramin(:,1), profundidade, Temperatramin(:,10), profundidade, Temperatura-
compmin(:,20), profundidadecomp, Temperaturacompmin(:,50), profundidadecomp, Temperatura-
compmin(:,110), profundidadecomp, Temperaturacompmin(:,590), profundidadecomp)
xlabel('Temperatura (C)'); ylabel('Profundidade (cm)');
legend('0min', '10min', '30min', '1h', '2h', '10h')
axis ([0 180 0 25])
set(gca, 'ydir', 'reverse');
set(gca, 'ytick', [0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25]);
set(gca, 'ygrid', 'on');

```